

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO



Maquinabilidade de componentes de latão com ferramentas em PCD

Rafael Simões Quinta

Dissertação realizada no âmbito do
Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

Orientador FEUP: Professor Abílio de Jesus

Co-orientador FEUP: Engenheiro Santiago Castellanos Villa

Orientador Grohe Portugal: Engenheiro João Fonte

Julho de 2018

Resumo

Esta dissertação é o resultado de um estágio curricular na empresa Grohe Portugal, S.A.. Esta empresa dedica-se à produção de corpos de torneiras em diferentes ligas de latão constituídas, essencialmente, por cobre e zinco (60 e 40%, respetivamente), contando ainda com elementos de liga como alumínio, estanho ou chumbo de forma residual na sua composição. De todos os elementos presentes, o chumbo tem especial importância no processo de maquinagem, uma vez que funciona como lubrificante permitindo reduzir os esforços de corte. Contudo, devido à legislação, que impõe limites do teor de chumbo, adotada por alguns dos países recetores de produtos Grohe existe a necessidade de se transitar para ligas com um teor de chumbo residual.

No sentido de perceber esta necessidade foi dada continuação ao estudo do Eng. Luís Amaral acerca das ligas utilizadas na empresa, fazendo-se uma análise aos resultados de esforços e potências de corte, pressões específicas de corte e rugosidades resultantes do processo de torneamento. Daqui verificou-se que a ausência do chumbo no latão acarreta prejuízos para as ferramentas de corte, já que se verifica um aumento dos esforços e potências de maquinagem, além de conduzir a aparas longas o que se torna indesejável para o processo de maquinagem. De forma complementar realizaram-se ensaios de tração e compressão a estes materiais para fazer uma melhor caracterização das propriedades mecânicas dos materiais.

Uma vez que as ferramentas de corte apresentam um grande impacto económico no processo produtivo foi necessário fazer um estudo dos diversos fatores que acabam por ter influência direta ou indireta no seu desgaste. Como tal, fez-se um acompanhamento da produção realizada por um conjunto de ferramentas em metal duro e procurou-se compará-la com aquela que resultou do uso de ferramentas em PCD, tendo-se verificado uma ligeira supremacia no número de peças realizadas pelas ferramentas em PCD. Contudo, no que toca ao rácio de produção/custo das ferramentas, constatou-se uma baixa rentabilidade deste tipo de ferramentas, pois o seu custo é cerca de três vezes maior do que o mesmo tipo de ferramentas em metal duro. A principal razão para que as ferramentas em PCD não sejam uma boa alternativa neste tipo de indústria tem a ver com a sua baixa tenacidade, que as torna inadequadas para maquinar peças que não apresentem características homogêneas (como é o caso daquelas que advêm do processo de fundição).

Paralelamente, foi desenvolvida uma formulação de um modelo mecanicista que permitiu realizar um estudo das forças desenvolvidas por cada uma das arestas das ferramentas de corte, constatando-se que o menor valor calculado é contrário aos resultados obtidos pela produção, uma vez que o desgaste desta aresta é o principal motivo pelo qual as ferramentas em metal duro são consideradas inoperacionais. Da análise feita aos resultados (teóricos e práticos) saíram um conjunto de propostas de melhorias de modo a aumentar a resistência ao desgaste.

Palavras-chave: Ligas Cu-Zn (latão), Maquinagem de Latão, Chumbo, Ferramentas de Corte, Artigos Sanitários em Latão, PCD, Metal Duro

Machinability of brass components with PCD tools

Abstract

This thesis is the result of a internship at the Grohe Portugal, S.A ., which is a comapny mainly dedicated to the production of tap bodies in different brass alloys. These alloys consist essentially of copper and zinc (60 and 40%, respectively), furthermore having alloying elements such as aluminum, tin or lead in their composition. Of all the elements present in the alloy, lead has special importance in the machining process, since it works as a lubricant allowing to reduce the cutting efforts and control the chips. However, due to the legislation, imposing limits on the lead content, adopted by some of the countries which are the recipients of Grohe products there is a need to switch to brass alloys with a residual lead content (lead free brass).

In order to understand this need, a study of Eng. Luís Amaral, previous work on the alloys used in the company, was carried out, analyzing the data of cutting forces and powers, specific cutting pressures and roughness, resulting from the turning process. It was found that the absence of lead in the brass entails damage to the cutting tools, since there is an increase of the cutting loads and machining powers, besides guaranteeing long chips which become undesirable for the automated machining process. Complementarily, tensile and compression tests were carried out on these materials to make a better characterization of the mechanical properties of the material.

Since cutting tools have a great economic impact on the productive process, it was necessary to study various factors having a direct or indirect influence on their life. As such, a follow-up was carried out on the production of a tool set in hard metal and compared with that produced by PCD tools, a slight increase in the number of parts made by PCD tools being observed. However, with regard to the production/cost ratio of the tools, it was found a low profitability of this type of tool, since their costs is about three times higher than the same type of tool in hard metal. The main reason PCD tools are not a good alternative in this type of industry has to do with their low toughness, which makes them unsuitable for machining parts that do not have uniform characteristics (as is the case with foundry).

At the same time, a formulation of a mechanistic model was presented to study the forces developed by each cutting edge of the tools, showing that the lowest calculated value is contradicted by the results obtained by the production, since the wear of this tool edge is the main reason why tools are considered inoperative. From the analysis done to the results (theoretical and practical) a set of production improvement proposals were made in order to increase the tools life.

Keywords: Cu-Zn alloys (brass), Brass Machining, Lead, Cutting Tools, Brass Sanitary fittings, PCD, Carbide tools

Agradecimentos

A elaboração de uma dissertação é um trabalho académico individual, no entanto, existem contributos cujo a importância não devo deixar de realçar. Desta forma, aproveito este espaço para, em primeiro lugar, agradecer ao meu orientador, o Professor Abílio de Jesus, pela partilha de todos os conhecimentos, pela sua disponibilidade, orientação e conselhos dados durante a realização deste trabalho. Agradecer também ao Eng. Santiago Castellanos Villa por toda a dedicação e disponibilidade demonstradas para auxiliar e discutir os ensaios realizados. Gostaria também de deixar uma palavra de apreço ao agora Engenheiro Luís Amaral, pela prévia colaboração e dedicação a este estudo e pela total disponibilidade para responder às demais dúvidas que foram surgindo, relacionadas com a empresa e com o trabalho por ele desenvolvido.

À Grohe Portugal pela oportunidade e confiança depositada em mim, que permitiu a realização do estágio, essencialmente ao Sr. Adelino Tavares, pelo interesse demonstrado pelo trabalho desenvolvido e pela prontidão para fornecer todas as explicações que contribuíram para o sucesso e enriquecimento deste trabalho e ao Eng. João Fonte por oferecer todas as condições para que fossem atingidos os objetivos traçados. Gostaria ainda de mostrar o meu apreço por todo o apoio, simpatia e disponibilidade de todas as pessoas com quem tive o prazer de contactar nesta empresa.

Reservo também este espaço para agradecer, simbolicamente, a todas as pessoas, com especial destaque à minha família e à minha namorada, que me acompanharam, tanto na minha vida pessoal, como académica, e que contribuíram para o meu sucesso, porque não existem, nem vão existir, palavras suficientes para descrever a gratidão que sinto por todos. Fica também aqui o registo de agradecimento a todos os meus amigos com os quais partilhei a maior parte das aventuras da vida académica.

O autor agradece à operação NORTE-01-0145-FEDER-000022 - *SciTech - Science and Technology for Competitive and Sustainable Industries*, projeto de I&D cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Norte ("NORTE2020"), através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).



Índice

1	Introdução	1
1.1	Enquadramento do projeto	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Estrutura da dissertação	3
2	Maquinagem.....	5
2.1	Processo de maquinagem. Maquinabilidade	5
2.2	Processo de formação e remoção da apara.....	6
2.3	Modelos de corte	6
2.3.1	Modelo de corte ortogonal	7
2.3.2	Modelo de corte oblíquo	9
2.4	Apara	10
2.5	Operações de corte	12
2.6	Parâmetros de corte	12
2.7	Ferramentas de corte.....	13
2.7.1	Geometria	14
2.7.2	Características	16
2.7.3	Materiais para as ferramentas	17
2.7.4	Revestimentos	24
2.7.5	Construção	27
2.7.6	Vida das ferramentas	28
2.8	Qualidade superficial	32
2.9	Lubrificação e refrigeração do processo de maquinagem.....	33
3	Ligas de Cu-Zn.....	37
3.1	Caracterização das ligas de Cu-Zn	37
3.2	Latão utilizado no processo produtivo Grohe	39
3.3	Maquinabilidade do Latão	40
4	Estudo da maquinabilidade do latão	45
4.1	Materiais	45
4.1.1	Ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do material.....	47
4.2	Procedimento experimental de maquinagem	52
4.3	Análise de resultados	54
4.3.1	Potências, Forças e Pressões Específicas de corte.....	54
4.3.2	Rugosidades	58
4.3.3	Aparas.....	59

4.4	Análise ANOVA	61
5 Processo produtivo na Grohe Portugal		63
5.1	Macharia e Fundição	63
5.2	Maquinagem	64
5.2.1	Ferramentas de corte	66
5.2.2	Elementos de fixação da peça	67
5.2.3	Operações, Parâmetros e Fluidos de corte	67
5.3	Lixamento e polimento	68
5.4	Galvânica	69
5.5	Montagem	69
6 Estudo do tempo de vida e material das ferramentas de corte		71
6.1	Identificação do caso de estudo	71
6.2	Procedimento experimental	72
6.2.1	Peça a maquinar	72
6.2.2	Ferramentas de corte	73
6.2.3	Caracterização das operações e parâmetros	74
6.3	Variantes do estudo	75
6.3.1	Ferramentas em metal duro	75
6.3.2	Ferramentas em PCD	77
6.4	Análise e discussão dos resultados	79
7 Caracterização experimental de esforços de corte e modelação		83
7.1	Ensaio experimental	84
7.1.1	Preparação do ensaio	84
7.1.2	Resultados experimentais	86
7.2	Modelo mecanicista de previsão de forças de corte	88
7.2.1	Modelo mecanicista de previsão de forças de corte para uma broca helicoidal	88
7.2.2	Aplicação do modelo mecanicista de previsão das forças de corte da furação para as ferramentas de estudo	92
8 Trabalhos de melhoria contínua		99
8.1	Trabalhos desenvolvidos	99
8.1.1	Tempos de ciclo	99
8.1.2	5S 100	
8.2	Perspetivas de melhoria	103
8.2.1	Redução de tempos de ciclo	103
8.2.2	Proposta de melhoria para a gestão do inventário de ferramentas de corte	104
8.2.3	Alteração da metodologia de controlo da qualidade à saída do processo de maquinagem	104

8.3	Trabalhos futuros.....	105
8.3.1	Estudo dos parâmetros de corte ótimos	105
8.3.2	Estudo da aproximação das ferramentas à peça a maquinar	105
8.3.3	Alteração da geometria das ferramentas de corte.....	106
8.3.4	Adicionar um elemento de substituição do chumbo.....	106
9	Conclusões	107
	Referências	111
	Anexos.....	117
A -	Broqueador de desbaste da bica.....	117
B -	Broqueador da base	118

Lista de figuras

Figura 1.1 - a) Logotipo do grupo Grohe; b) Logotipo do grupo LIXIL [1].	1
Figura 2.1 - Modelo de corte ortogonal a) e modelo de corte oblíquo b) [7].	6
Figura 2.2 - Componentes da força de maquinagem no torneamento cilíndrico [3].	8
Figura 2.3 – a) Modelo de corte ortogonal; b) Modelo de corte oblíquo [3].	9
Figura 2.4- Classificação do tipo de apara: a) apara descontínua; b) apara contínua; c)apara contínua com formação de aresta postiça de corte; d) apara serrilhada [6].	11
Figura 2.5 - Tipos de apara consoante a norma ISO 3685 [3].	11
Figura 2.6 - Relacionamento da geometria da para em função do avanço e da velocidade de corte [4].	12
Figura 2.7 - Operações de maquinagem: a) Torneamento; b) Fresagem cilíndrica; c) Fresagem de topo [6].	12
Figura 2.8- a)Ferramenta monofilar; b) Ferramenta multifilar [13].	14
Figura 2.9 - Geometria da ferramenta de corte [3].	14
Figura 2.10 - Representação do ângulo de posição da aresta de corte e do ângulo de ponta da ferramenta [3].	15
Figura 2.11– a) Diferentes representações do ângulo de ataque da ferramenta; b) Representação do ângulo de saída da ferramenta [6, 14].	15
Figura 2.12 - Representação do ângulo de gume da ferramenta a) e do raio da ferramenta b) [4, 15].	16
Figura 2.13 - Distribuição das categorias dos materiais das ferramentas de corte em função da sua dureza e tenacidade [16].	17
Figura 2.14- Evolução da utilização dos materiais nas ferramentas de corte [6].	17
Figura 2.15 - Superfície de PCD obtidas pelos diferentes processos de fabrico: a) Retificação; b) Eletroerosão; c) <i>Laser</i> [24].	23
Figura 2.16- Comparação dos revestimentos em função da sua resistência ao desgaste no flanco e de cratera [29].	26
Figura 2.17 – a) Diferentes geometrias de pastilhas de corte; b) Ferramenta com pastilha de corte [4, 6].	27
Figura 2.18 - a) Ferramenta de corte integral; b) Ferramenta com insertos brasados [34].	28
Figura 2.19 - a) Ferramenta de corte de suporte integrado; b) Ferramenta de corte com quebra-apara [4].	28
Figura 2.20 Influência dos parâmetros de corte no tempo de vida da ferramenta de corte. Adaptado de [4].	29

Figura 2.21– Desgaste da ferramenta de corte em função dos parâmetros de corte [6].	29
Figura 2.22- Mecanismos de desgaste em função dos parâmetros de corte e da temperatura de corte [37].	30
Figura 2.23- Lei de Taylor, relação da vida da ferramenta com a velocidade de corte [6].	32
Figura 2.24 - Rugosidade média aritmética (Ra) associada aos processos de maquinagem de acordo com a norma DIN4766 [3].	33
Figura 2.25 - Análise à influência do fluido de corte no calor gerado no processo de maquinagem [9].	35
Figura 2.26- - Representação da lubrificação interna a) e externa b) das ferramentas de corte [4].	35
Figura 2.27 - Representação do processo de MQL [40].	35
Figura 3.1 - a) Diagrama de fases do Cu-Zn; b) Microestrutura do latão com Pb, fases α e β [46, 47].	37
Figura 3.2 - Microestrutura do latão: a) Cu 59.0-64.5, Zn 33.2-40.0, Pb 1.3-2.3, Fe 0.10; b) Cu 60.0-63.0, Zn 33.0-37.0, Pb 2.5-3.7, Fe 0.35 [52].	41
Figura 4.1 -Microestrutura dos latões resultantes da fundição: a) Liga L; b) Liga R; c) Liga Z.	46
Figura 4.2 - Marcação dos provetes de tração com linhas de referência: a) provete pintado; b) marcação do provete; c) provete marcado.	48
Figura 4.3- a) Alocação do provete na máquina de ensaios de tração; b) Colocação do transdutor de deslocamento; c) Ensaio de compressão.	49
Figura 4.4 – Resultados dos ensaios de tração das ligas R, L e Z.	49
Figura 4.5 - a) Rotura do provete na zona de marcação da linha de referência; b) Defeito no interior do provete.	50
Figura 4.6 - Apresentação dos provetes que sofreram estricção (Z1.1, Z1.2 e Z2).	51
Figura 4.7- Resultados dos ensaios de compressão das ligas R, L e Z.	51
Figura 4.8 - Configuração final dos provetes de compressão das ligas R e L em a) e da liga Z em b).	51
Figura 4.9 - a) Ferramenta de corte utilizada nos ensaios de torneamento; b) Provetes cilíndricos utilizados nos ensaios de torneamento; c) Célula de carga; d) Geometria da pastilha de corte.	53
Figura 4.10– a) Rácio entre a força de avanço e força de corte; b) Rácio entre a força de penetramento e a força de corte.	55
Figura 4.11- Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento nas forças de corte: a) $ap=0.25$ mm; b) $ap= 0.5$ mm; c) $ap=1.5$ mm.	56

Figura 4.12 - Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento na potência de corte: a) $ap=0.25$ mm; b) $ap=0.5$ mm; c) $ap=1.5$ mm.	57
Figura 4.13- Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento na pressão específica de corte: a) $ap=0.25$ mm; b) $ap=0.5$ mm; c) $ap=1.5$ mm.	58
Figura 4.14 - Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento em Ra : a) $ap=0.25$ mm; b) $ap=0.5$ mm; c) $ap=1.5$ mm.	58
Figura 4.15 – Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento em RZ : a) $ap=0.25$ mm; b) $ap=0.5$ mm; c) $ap=1.5$ mm.	59
Figura 4.16– Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento em $Rmax$: a) $ap=0.25$ mm; b) $ap=0.5$ mm; c) $ap=1.5$ mm.	59
Figura 4.17– Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento no tipo de apar gerada.....	61
Figura 5.1 - a) Coquilha de cobre; b) Alocação do macho de areia no interior da coquilha.	64
Figura 5.2 – Processo de corte manual em a) e de forma automática em b).	64
Figura 5.3 - Elementos de controlo: a) Calibres; b) Gabari.....	65
Figura 5.4 - Peça com areia alojada.	66
Figura 5.5 - Mecanismo de fixação da peça a maquinar: a) mordente vazio; b) mordente com a peça resultante da fundição; c) peça maquinada.....	67
Figura 5.6 - Processo de lixamento automático (a)) e manual (b)).	68
Figura 6.1 - Desenho da peça a maquinar: a)2D; b) 3D.....	72
Figura 6.2 - Peça antes e depois de ser maquinada: a) vista lateral; b) vista de cima; c) vista de frente; d) vista de baixo.	73
Figura 6.3 - Produto final com o corpo analisado [1].	73
Figura 6.4 – Ferramentas em análise: a) Broqueador de desbaste do cartucho; b) Broqueador da base; c) Broqueador de desbaste da bica.	74
Figura 6.5 - a) Broqueador de desbaste da bica; b) Broqueador da base; c) Broqueador de desbaste do cartucho.	75
Figura 6.6 - a) Broqueador da base; b) Broqueador de desbaste da bica; c) Broqueador de desbaste do cartucho.	77
Figura 6.7 – a) Buris amovíveis nas ferramentas em metal duro; b) Buris não amovíveis nas ferramentas de PCD.....	78
Figura 6.8 - Peça defeituosa resultante do erro de construção do broqueador da base.	78
Figura 6.9– Comparação do rácio produção por custo da ferramenta para o metal duro e PCD.	80

Figura 7.1- Ferramentas para ensaio: a) Broqueador da base; b) broqueador de desbaste da bica; c) Broqueador desbaste do cartucho.....	83
Figura 7.2 - Máquina DMU60 eVo utilizada no processo de furação.	84
Figura 7.3 - Fixação dos provetes na bucha de quatro grampos, após a preparação dos mesmos.	85
Figura 7.4- Conjunto de equipamentos utilizados na medição de esforços da ferramenta de corte.	86
Figura 7.5- Provette danificados devido à incapacidade de fixação com bucha de 4 mordentes: a) vista lateral; b) vista de cima.	86
Figura 7.6- Forças de corte obtidas no processo de furação para o broqueador da base.....	87
Figura 7.7- Forças de corte obtidas no processo de furação para o broqueador de desbaste da bica.	87
Figura 7.8 - Representação das forças envolvidas no processo de corte, operação da furação com broca helicoidal [55].....	88
Figura 7.9 - Sistemas de eixos da broca [54].....	89
Figura 7.10 - Designações dos parâmetros do modelo mecanicista considerado [54].	89
Figura 7.11 - Representação das forças desenvolvidas pela ferramenta de corte [57].	91
Figura 7.12- Relação de K_s com o avanço da ferramenta (f_n) para a liga L a uma frequência de rotação de 1100 rpm e profundidade de corte (ap) de 1.5 mm.	92
Figura 7.13 - Relação de K_s com o avanço da ferramenta (f_n) para a liga L a uma frequência de rotação de 2000 rpm e profundidade de corte (ap) de 1.5 mm.	92
Figura 7.14- Análise à geometria do broqueador de desbaste da bica.	93
Figura 7.15- Análise à geometria do broqueador da base.	93
Figura 7.16 -Identificação das arestas de corte no broqueador de desbaste da bica.	94
Figura 7.17 -Identificação das arestas de corte no broqueador da base.	95
Figura 7.18- Previsão forças de corte para o broqueador da base.....	95
Figura 7.19- Previsão de forças de corte para o broqueador de desbaste da bica.	96
Figura 7.20 - Estado da aresta dos buris da ferramenta de PCD após esta ser considerada inoperacional: a) vista de frente; b) vista lateral.....	96
Figura 7.21- Previsão de esforços de corte para cada uma das arestas para o broqueador de desbaste da bica.	97
Figura 7.22 - Previsão de esforços de corte para cada uma das arestas para o broqueador da base.	97

Figura 7.23- Comparação dos valores previstos e dos valores experimentalmente obtidos para broqueador da base.	98
Figura 7.24- Comparação dos valores previstos e dos valores experimentalmente obtidos para o broqueador de desbaste da bica.	98
Figura 8.1 - Esquema de funcionamento do centro CNC Triflex.	99
Figura 8.2 - Caixas antigas danificadas: a) exterior da caixa; b) interior da caixa.	101
Figura 8.3 - Caixas de vedantes novas para o teste de estanquidade.	102
Figura 8.4 - Definição de zonas na ferramentaria da maquinagem.....	102
Figura 8.5 - Armário de arrumação: a) antes e b) depois da aplicação dos 5S.....	102
Figura 8.6 - Melhoria dos quadros de informação dos centros CNC.....	103
Figura A.1 - Ensaio de furação com o broqueador de desbaste da bica para $fn = 55 \text{ mm/min}$ e $n = 2000 \text{ rpm}$	117
Figura A.2 - Ensaio de furação com o broqueador de desbaste da bica para $fn = 45 \text{ mm/min}$ e $n = 2000 \text{ rpm}$	117
Figura B.1 - Ensaio de furação com o broqueador da base para $fn = 4 \text{ mm/min}$ e $n = 1100 \text{ rpm}$	118
Figura B.2 - Ensaio de furação com o broqueador da base para $fn = 7 \text{ mm/min}$ e $n = 1100 \text{ rpm}$	118

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características dos diferentes tipos de aparas [11]	11
Tabela 2.2 - Propriedades das categoriais de materiais utilizados nas ferramentas de corte [3]	17
Tabela 2.3 - Composição química e dureza dos aços rápidos do grupo T e M [3]	18
Tabela 2.4 - Classificação dos carbonetos sinterizados	20
Tabela 2.5 - Composição química e propriedades para metais duros [3].....	20
Tabela 2.6 - Propriedades dos cerâmicos [18].....	21
Tabela 2.7 - Revestimentos utilizados em ferramentas de corte, as suas características e aplicações	25
Tabela 2.8 - Tipos de desgaste verificados nas ferramentas de corte, a sua causa e solução [4, 37].....	31
Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas das ligas Grohe fornecidas pela empresa e revistas, segundo a norma DIN EN 1982	40
Tabela 4.1 - Composição química em percentagem de massa de cada uma das amostras	46
Tabela 4.2 – Dureza HV das amostras	47
Tabela 4.3 - Provetes para ensaios de tração e compressão	48
Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas observadas nos ensaios de tração.....	50
Tabela 4.5- Propriedades mecânicas observadas nos ensaios de compressão	52
Tabela 4.6 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de torneamento.....	53
Tabela 4.7 - Características da pastilha da ferramenta de corte.....	54
Tabela 4.8 - Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga L	61
Tabela 4.9 - Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga R.....	62
Tabela 4.10 - Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga Z	62
Tabela 6.1 - Resultados do ensaio ao broqueador de desbaste do cartucho em metal duro	76
Tabela 6.2 - Resultados do ensaio ao broqueador de desbaste da bica em metal duro	76
Tabela 6.3 - Resultados do ensaio ao broqueador da base em metal duro	77
Tabela 6.4 - Análise aos resultados dos ensaios em metal duro	77

Tabela 6.5 - Resultados do ensaio ao broqueador de desbaste da bica em PCD	78
Tabela 6.6 - Resultados do ensaio ao broqueador de desbaste do cartucho em PCD	79
Tabela 6.7 - Análise aos resultados dos ensaios em metal duro	79
Tabela 6.8 - Custos associados às ferramentas em análise.....	80
Tabela 7.1 - Provetes utilizados no ensaio de furação	84
Tabela 7.2 - Parâmetros de corte utilizados para o processo de modelação de forças de corte...	85
Tabela 7.3 - Parâmetros de corte utilizados no ensaio das ferramentas de corte.....	92
Tabela 7.4 - Valores de K_s em função dos parâmetros de corte ensaiados para cada uma das ferramentas de corte.....	93
Tabela 7.5 - Arestas de corte em trabalho em função da profundidade de corte.....	95
Tabela 8.1 - Parâmetros de corte e tempos de ciclo do produto a melhorar.....	100

Abreviaturas e Símbolos

Lista de abreviaturas

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CBN	Nitreto cúbico de boro
CNC	Comando Numérico Computorizado (<i>Computer Numerical Control</i>)
CVD	<i>Chemical Vapour Deposition</i>
DEMec	Departamento de Engenharia Mecânica
FCVA	<i>Filtered Cathodic Vapour Arc</i>
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
HM	Metal duro (<i>Hard Metal</i>)
HSS	Aço rápido (<i>High Speed Steel</i>)
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MQL	Quantidade mínima de lubrificação (<i>Minimal Quantity Lubrication</i>)
PACVD	<i>Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition</i>
PCD	Diamante policristalino (<i>Polycrystalline Diamond</i>)
PVD	<i>Physical Vapour Deposition</i>

Símbolos

a_p	Profundidade de corte [mm]
D	Diâmetro [mm]
f_n	Avanço por rotação [mm/rot]
f_z	Avanço por aresta ou dente [mm]
F_a	Força de avanço (ou F_x) [N]
F_c	Força de corte (ou F_z) [N]

F_{ec}	Força efetiva de corte [N]
F_m	Força de maquinagem [N]
F_p	Força de penetramento (ou F_y) [N]
K_s	Pressão específica de corte [N/mm ² ou MPa]
L	Comprimento de maquinagem [mm]
M_z	Binário transmitido pela árvore à ferramenta [Nm]
N	Frequência de rotação [rpm]
P_c	Potência de corte [W]
P_{ec}	Potência efetiva de corte [W]
R_a	Rugosidade média aritmética [μ m]
R_{max}	Rugosidade máxima [μ m]
R_z	Rugosidade máxima média [μ m]
S	Secção da apara não deformada [mm ²]
V	Taxa de remoção de material (ou <i>MRR - Material Removal Rate</i>) [cm ³ /min]
V_c	Velocidade de corte [m/min]
V_f	Velocidade de avanço [m/min]
z	Número de arestas de corte na ferramenta

1 Introdução

Neste capítulo, faz-se uma breve introdução à motivação do tema proposto para realização da dissertação na Grohe Portugal, fazendo-se desta forma uma contextualização do projeto. Será ainda apresentado um resumo da estrutura geral da dissertação, assim como os objetivos propostos e que se esperam alcançar.

1.1 Enquadramento do projeto

Ao longo das últimas décadas, as empresas têm-se deparado com crescentes dificuldades para acompanhar o mercado, exponencialmente diverso e exigente. Isto deve-se, principalmente, à existência de uma concorrência cada vez mais forte resultante da globalização dos mercados de bens e de serviços. Consequentemente, as empresas vêm-se obrigadas a agir, de uma forma muito rápida e com qualidade, sem excluírem a necessidade de suportar os custos necessários à manutenção da sua competitividade perante as solicitações do mercado. Assim, verifica-se uma melhoria contínua dos processos, procurando sempre uma redução de custos e manter a produtividade constante ou, no melhor dos casos, aumentá-la.

O trabalho prático teve lugar na Grohe Portugal - Componentes Sanitários, Lda, no departamento de fundição e maquinaria, com uma duração aproximada de cinco meses. Esta empresa é uma das cinco unidades de produção do grupo Grohe S.A., sendo que as restantes estão distribuídas pela Alemanha (Hemer, Lahr e Porta Westfalica) e Tailândia (Klaeng). Recentemente, este grupo tornou-se parte da LIXIL Group Corporation, uma empresa líder do mercado global na indústria de artigos sanitários. Na Figura 1.1 a) e 1.1 b) são apresentados os logotipos da Grohe e do grupo LIXIL, respetivamente. Trata-se de uma empresa que é, nos dias de hoje, uma referência mundial na produção de componentes sanitários, sendo que a gama de produtos abrange desde torneiras de características mais clássicas, até ao que se pode chamar tecnologia de ponta neste ramo de negócios. Tendo como principal meta os elevados padrões de qualidade, além do *design* inovador que os seus produtos apresentam, este posicionamento tem possibilitado à Grohe um contínuo reconhecimento da qualidade dos seus produtos, que lhe valeram a atribuição de diversos prémios ao longo dos últimos anos [1].



Figura 1.1 - a) Logotipo do grupo Grohe; b) Logotipo do grupo LIXIL [1].

De modo a dar continuidade ao trabalho de caracterização mecânica e da maquinabilidade do latão iniciado em período homólogo do ano letivo passado pelo Engenheiro Luís Amaral foi proposto pela Grohe Portugal um tema de dissertação que envolvia o estudo do tempo de vida das ferramentas e o desenvolvimento de um programa de gestão das ferramentas. Uma vez que foram tidas em conta algumas das propostas de melhoria mencionadas pelo autor do trabalho anterior, como a possibilidade de uso de ferramentas em PCD, pretende-se avaliar qual o impacto que este tipo de ferramentas pode vir a ter no processo produtivo da empresa e determinar a relação custo/benefício das mesmas. Genericamente, pretende-se introduzir melhorias no processo produtivo da Grohe Portugal, particularmente no departamento de maquinagem, e com o registo de informações pertinentes acerca do mesmo, nomeadamente de tempos de vida de ferramentas.

1.2 Objetivos

O objetivo do trabalho desenvolvido nesta dissertação traduz-se num estudo do processo de maquinagem no qual são avaliados os tempos de vida e os esforços a que estão sujeitas as ferramentas de corte em metal duro e em PCD, além de promover o desenvolvimento de ideias que permitam uma gestão mais eficiente e cuidada destas ferramentas, de modo a que não se verifique o seu desgaste prematuro e, consequentemente, o processo não acarrete custos desnecessários, reduzindo-se assim o custo específico das ferramentas. Para tal, definiram-se os seguintes pontos, como ordens de trabalho a desenvolver:

- Caracterização dos materiais

O conhecimento dos materiais a ser maquinado é de extrema importância para que se tenha uma expectativa correta dos esforços que a maquinagem desse material acarreta para a ferramenta de corte. Assim, serão desenvolvidos ensaios de caracterização mecânica das ligas utilizadas no processo produtivo.

- Desenvolvimento de um modelo capaz de prever os esforços de corte

O desenvolvimento de um modelo que seja capaz de prever e avaliar os esforços de corte irá permitir analisar quais as arestas de corte que estarão sujeitas a maior desgaste e, deste modo, fazer uma comparação com os resultados obtidos do processo produtivo e retirar ilações sobre a correta utilização das ferramentas e dos respetivos parâmetros de corte.

- Comparação da produção garantida por materiais distintos nas ferramentas de corte

Pretende-se fazer o estudo da relação custo/benefício para ferramentas de corte em materiais distintos. Assim, serão aproveitadas as ferramentas existentes em metal duro e ferramentas de PCD novas.

- Desenvolvimento de um plano de gestão de ferramentas de corte

O plano de gestão de ferramentas passará inicialmente por fazer uma verificação rigorosa do *stock* de ferramentas, de modo a que seja possível ter um controlo sobre a quantidade de ferramentas para que, no caso de um dado produto entrar em produção, saber à partida o período de tempo necessário para que este possa ser produzido, em função das ferramentas existentes.

Adicionalmente, tendo em conta que se trata de uma dissertação em âmbito empresarial, espera-se que seja possível contribuir para a melhoria do processo produtivo com outros objetivos como:

- Redução de tempos de ciclo

Fazendo um estudo mais pormenorizado dos parâmetros de corte a utilizar e analisando a melhor maneira de alocação das ferramentas no centro CNC, espera-se que seja possível fazer uma redução dos tempos de ciclo de produção

1.3 Estrutura da dissertação

O presente relatório foi concebido de modo expor todo o trabalho desenvolvido ao longo do período de estágio. Como tal, este inicia com um capítulo introdutório, onde é feita uma breve contextualização com a apresentação da empresa e motivos que originaram a escolha deste tema, os objetivos a cumprir durante os cinco meses de estágio e, por fim, a apresentação da estrutura adotada para a dissertação.

Concluído o capítulo introdutório, deu-se início à revisão bibliográfica, onde se fez a recolha de informação relevante relacionada com os temas. É necessário referir que este processo de pesquisa incessante envolveu uma hierarquização de tópicos subjacentes ao tema central do trabalho, de modo a que se conseguisse adquirir um conhecimento sustentado acerca da maquinagem em geral, das ligas de latão e, principalmente, da maquinabilidade das ligas de latão. Importa referir que a pesquisa foi facilitada pela quantidade razoável de informação disponibilizada acerca da maquinabilidade do latão, principalmente no que toca a ligas de latão sem chumbo. De modo a poder obter informação com a maior qualidade possível, recorreu-se essencialmente a bases de dados de artigos científicos, dissertações e livros técnicos.

No capítulo seguinte (capítulo 3), aplicaram-se alguns dos conhecimentos adquiridos nos capítulos antecedentes relativamente à maquinabilidade do latão. Assim, procurou-se, inicialmente, fazer uma sistematização dos dados obtidos no trabalho, previamente realizado nesta empresa, sobre a maquinabilidade do latão e de seguida, fazer ensaios complementares de caracterização das propriedades mecânicas do material para que fosse possível fazer uma análise mais completa à influência do chumbo na maquinagem com ferramentas PCD. Reunida toda a informação e retiradas as devidas conclusões, preparou-se um artigo científico relativo ao tema, para apresentação na conferência MDA 2018 e publicação em revista internacional.

De seguida (capítulo 5) fez-se uma revisão sobre todo o processo produtivo na Grohe Portugal, com maior destaque para o departamento de maquinagem. Aqui exploraram-se de forma minuciosa, todas as características do processo, desde parâmetros de corte utilizados, análise das ferramentas de corte, ao modo de fixação das peças no interior dos centros CNC e, inclusive uma análise ao modo como é feito o controlo de qualidade.

De forma a cumprir, os objetivos previamente estabelecidos, apresenta-se uma secção (capítulo 6) relativamente ao estudo do tempo de vida das ferramentas onde são apresentadas e caracterizadas as ferramentas acompanhadas, assim como os resultados e alguns comentários relativamente a estes. Associado a este tema, desenvolveu-se um novo capítulo (capítulo 8) onde é apresentado o modelo mecanicista de previsão das forças de corte, que permitiu fazer uma comparação dos resultados teóricos com os que foram obtidos num ensaio experimental de maquinagem com ferramentas em PCD e aqueles que se verificaram no capítulo anterior.

Já na parte final da dissertação apresenta-se um capítulo onde são referidos os trabalhos de melhoria contínua (capítulo 8) que poderão ser implementadas num futuro próximo e que trarão vantagens para o processo produtivo e ainda sugestões de trabalhos futuros que poderão ser desenvolvidos, de modo a completar o trabalho realizado nesta dissertação.

No capítulo final (capítulo 9) apresentam-se as conclusões retiradas do presente trabalho.

2 Maquinagem

No mundo moderno, o fabrico de peças está cada vez mais desenvolvido e, para tal, existem diversos processos de fabrico para as conceber desde a fundição, à soldadura, passando pela conformação plástica ou a maquinagem, sendo que muitas das vezes estes processos são utilizados de forma complementar.

Entre as diferentes áreas industriais, uma das mais importantes no setor da metalomecânica são protagonizadas por indústrias que utilizam processos de fabrico por arranque de apara, também conhecidos por processos de maquinagem. Desta forma, tendo em conta o real objetivo da dissertação, será apresentada uma breve revisão bibliográfica ao tema.

2.1 Processo de maquinagem. Maquinabilidade

Maquinagem é o termo geral usado para descrever o processo de remoção de material controladamente, de modo a que seja obtida a configuração final da peça pretendida. O processo de maquinagem pode ser utilizado com um processo integral, isto é, transformação do material desde a matéria prima até ao produto final ou pode servir de complemento a qualquer outro processo de fabrico, nomeadamente no que toca a operações de acabamento. Este processo caracteriza-se pela qualidade superficial que oferece e pela capacidade de assegurar as tolerâncias dimensionais e geométricas exigidas pela função à qual se destina o produto [2].

As principais desvantagens associadas aos processos de maquinagem têm a ver com o elevado tempo consumido para a elaboração do processo que, comparativamente aos outros processos de fabrico tradicionais (como a fundição ou conformação plástica), é elevado, e a quantidade de material desperdiçado pela remoção da apara.

O processo de maquinagem pode ser classificado segundo duas grandes categorias: maquinagem convencional e maquinagem não convencional. Enquanto que na maquinagem convencional existe contacto direto entre a ferramenta de corte e o material, tal não acontece para a maquinagem não convencional, onde é utilizada uma fonte de energia para proceder à remoção do material [3].

Introduzido o conceito de maquinagem, torna-se essencial introduzir um outro conceito - maquinabilidade. Esta pode ser definida como maior ou menor facilidade com que um material pode ser processado através de uma ferramenta de corte, procedendo-se ao arranque de apara e alterando a sua geometria para alcançar a forma final. O conceito “boa maquinabilidade” refere-se a um bom acabamento superficial, baixa força e potência de corte consumida, além do baixo desgaste da ferramenta. É definido também, o Índice de Maquinabilidade que trata de uma comparação da maquinabilidade dos materiais com um material de referência [4, 5, 6].

2.2 Processo de formação e remoção da apara

A maquinagem convencional caracteriza-se pela remoção de material por formação de apara, causada pela aplicação de esforços de corte por uma ferramenta em contacto direto com a peça. O mecanismo de base envolvido no processo de corte por remoção da apara corresponde a uma deformação localizada induzida no material de trabalho imediatamente antes da ponta da ferramenta. Esta deformação (primária) é causada pelo movimento relativo entre a ferramenta e a peça de trabalho que gera a compressão do material junto à aresta de corte da ferramenta, promovendo assim o aumento da força de maquinagem, até que as tensões de corte se tornem suficientemente elevadas de modo a iniciar o escorregamento, sem perda de coesão, entre o material removido e a peça. Na segunda fase, a penetração da ferramenta em relação à peça continua e pode verificar-se a formação de uma fissuração na região de corte, promovendo o aparecimento de uma apara contínua (para o caso de fissuração parcial) ou uma apara descontínua (na fissuração total). A apara é assim empurrada sobre a face de ataque da ferramenta de corte, verificando-se uma deformação adicional (chamada de deformação secundária) [3, 7].

2.3 Modelos de corte

Tendo em conta a complexidade do fenómeno de corte por arranque de apara, resultado do grande número de fatores em jogo, surgiu a necessidade de criação de um modelo físico/matemático que, baseado num conjunto de hipóteses simplistas, fosse capaz de traduzir a realidade o mais aproximadamente possível e deduzir consequências que a experimentação tem confirmado [3].

Verifica-se, então, a existência de vários modelos ainda longe de um consenso, contudo já apresentam resultados muito satisfatórios e de grande utilidade para a compreensão do fenómeno, havendo destaque para dois modelos em particular: o corte ortogonal (Figura 2.1 a)) e o corte oblíquo (Figura 2.1 b)) [3, 8].

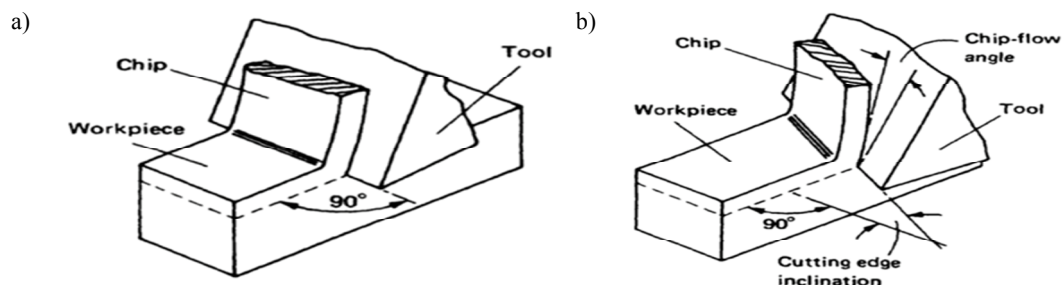


Figura 2.1 - Modelo de corte ortogonal a) e modelo de corte oblíquo b) [7].

2.3.1 Modelo de corte ortogonal

Este modelo de corte apresenta uma representação mais simplificada quando comparado com o modelo de corte oblíquo, no que ao tratamento matemático diz respeito, já que permite eliminar muitas das variáveis independentes. Tudo isto resulta da consideração de que o processo de corte é bidimensional com formação de aparas contínuas, sendo que a ferramenta de corte atua de forma perpendicular à direção do movimento relativo ao material de trabalho. Por outras palavras, o corte diz-se ortogonal quando a direção efetiva de corte e, consequentemente, a velocidade efetiva de corte é perpendicular à aresta de corte [3, 6, 8, 9].

Embora este modelo só seja aproximado em alguns processos de torneamento, esta simplificação não altera a essência do fenómeno, uma vez que as conclusões a que este modelo conduz são aplicáveis ao corte tridimensional de forma muito satisfatória [3, 6, 8, 9].

Uma outra aproximação feita, está relacionada com a profundidade da camada de material removido pela ação da ferramenta. Esta é conhecida como a espessura da apana não deformada e, embora na prática esta dimensão varie à medida que o corte prossegue, de modo a facilitar a análise teórica do processo, esta passa a ser considerada constante. Existe ainda um outro conjunto de condições adotadas que tornam o modelo ortogonal uma boa aproximação, nomeadamente o facto de se considerar que o material a maquinar apresenta uma deformação elástica desprezável, estipulou-se que a deformação da apana é plana e o comprimento da aresta de corte superior à largura de corte, que a força de atrito, entre a apana e a face de ataque, é proporcional à componente normal da força e que a ação da ferramenta de corte sobre a peça reduz-se a uma força aplicada na aresta de corte. Por outro lado, nesta modelação, não são tomados em consideração aspetos como o efeito da temperatura nas características mecânicas do material a maquinar, a deformação plástica na face de ataque da ferramenta de corte e o efeito do desgaste sobre a geometria de corte [3, 9].

2.3.1.1 Pressão específica de corte, potências e forças de maquinagem

O arranque da apana resultante da interação entre a peça e a ferramenta, durante a maquinagem, dá origem ao aparecimento de uma força de contacto, que geralmente, por simplificação, se considera que atua num ponto.

A análise vetorial das forças numa operação de corte é de grande interesse para a caracterização da maquinabilidade e comportamento do material a maquinar, assim como na previsão das condições de vida das ferramentas de corte e na estimativa da potência necessária ao corte. No que diz respeito às forças existentes num processo de maquinagem por arranque de apana, não se pode fazer um estudo universal, já que dependendo do tipo de operação em análise, as forças de corte terão sentidos e direções distintos. Contudo, será aqui apresentado o caso do torneamento, como já foi referido anteriormente, trata-se da operação de maquinagem que mais se aproxima do corte ortogonal [3, 10, 11].

A força resultante da interação entre a peça e a ferramenta é habitualmente designada por força de maquinagem (F_m). Esta força pode ser decomposta segundo as três direções ortogonais: Força de avanço (F_a); Força de corte (F_c); Força de penetramento (F_p), as três componentes da força de maquinagem é apresentada na Figura 2.2 [3].

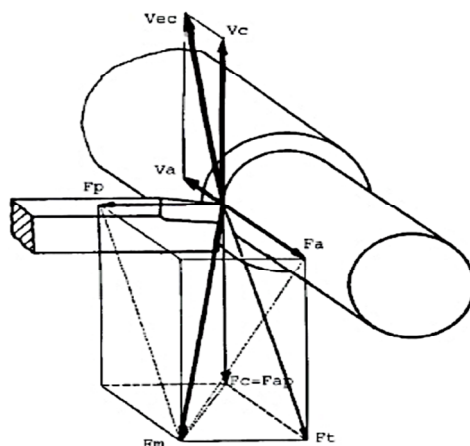


Figura 2.2 - Componentes da força de maquinagem no torneamento cilíndrico [3].

Assim, tem-se que a força de maquinagem pode ser dada por:

$$F_m = \sqrt{F_a^2 + F_p^2 + F_c^2} \quad (2.1)$$

Pode também definir-se a força efetiva de corte (F_{ec}) como a projeção da força de maquinagem (F_m) sobre a direção efetiva de corte. Relativamente às potências necessárias a fornecer à máquina no processo de corte é dada pelo produto da força de maquinagem (F_m) na direção efetiva de corte (P_{ec}), pela velocidade de corte efetiva (V_{ec}):

$$P_{ec} = F_{ec} \cdot V_{ec} = F_c \cdot V_c + F_a \cdot V_a \quad (2.2)$$

Dado que a força e a velocidade na direção de avanço são bastante reduzidas quando comparadas com a força e velocidade na direção de corte, estas componentes podem ser desprezadas e a potência passa a ser dada por [3]:

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad (2.3)$$

A pressão específica de corte (K_s) é um dos parâmetros com especial interesse no processo de maquinagem, uma vez que permite avaliar a resistência do material no processo de corte, sendo definida por [3]:

$$K_s = \frac{F_c}{S} = \frac{F_c}{a_p \cdot f_n} \quad (2.4)$$

onde F_c é a força de corte e S a secção da apara não deformada dada pelo produto da profundidade de corte, a_p , pelo avanço, f_n .

Resultados experimentais revelam que a pressão específica de corte mostra uma dependência negativa com a secção da apara, aumentando o seu valor com a redução da secção da apara, variando essencialmente consoante os parâmetros de corte, o material base a maquinar e a ferramenta de corte.

O interesse prático por este parâmetro reflete-se na possibilidade de estimar, ainda que de forma aproximada, os esforços de corte. De entre as várias fórmulas existentes na literatura, destaca-se a proposta da *AWF* (*Ausschuss für Wirtschaftliche Fertigung* – Associação de produção económica), que define a pressão específica de corte pela seguinte fórmula:

$$K_s = \frac{C_w}{f_n^{0.47}} \quad (2.5)$$

Onde C_w é uma constante do material ($C_w = 54$ no caso do latão) [3, 5].

2.3.2 Modelo de corte oblíquo

Embora em algumas operações de maquinaria, tais como o sangrar ou ranhurar em torneamento, e a fresagem cilíndrica tangencial se possam considerar operações de corte bidimensional (corte ortogonal), a maioria das operações são de corte tridimensional e como tal deve ser considerado o modelo de corte oblíquo.

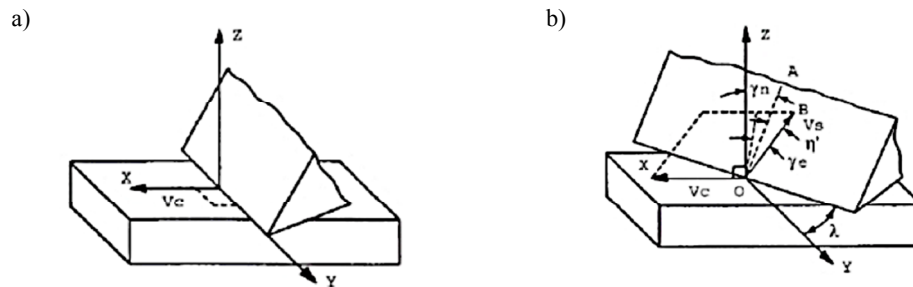


Figura 2.3 – a) Modelo de corte ortogonal; b) Modelo de corte oblíquo [3].

Neste modelo, a aresta de corte da ferramenta deixa de estar disposta perpendicularmente à velocidade de corte, de tal modo que se verifica a existência de ângulo de inclinação da aresta de corte (λ) e do ângulo de posição da aresta de corte (χ) que obriga a apara a desviar-se relativamente à direção perpendicular à aresta de corte, provocando a variação do ângulo de ataque normal (γ_n) e do comprimento de contacto apara/ferramenta. Na Figura 2.3 a) e b) encontra-se esquematizado os diferentes ângulos em cada um dos modelos [3].

Enquanto que no modelo de corte ortogonal o fluxo da apara toma uma direção normal à aresta de corte, no modelo de corte oblíquo tal não acontece uma vez que a apara tende a escoar-se segundo um percurso que está inclinado, em relação à normal, um ângulo η' . Desta forma, alguns investigadores desenvolveram expressões que permitem relacionar os novos parâmetros adicionados por este modelo, de tal forma que podem ser utilizadas as considerações do modelo de corte ortogonal [3].

2.4 Apara

A aparta é um importante elemento de análise da maquinabilidade de um dado material. Como tal, a sua caracterização é feita consoante o seu tipo e a sua forma. O tipo de aparta obtido no processo de maquinagem depende de fatores como o material a maquinar, parâmetros e ferramentas de corte ou estado da máquina. Para o estudo destes tipos de aparta, será considerado um modelo de corte ortogonal. Assim, consoante as forças e os materiais envolvidos, podem surgir quatro tipos de apartas que são representadas na Figura 2.4:

- Aparta descontínua

Este tipo de aparta é caracterizado por se compor em segmentos e é característica de processos de maquinagem a baixas velocidades de corte com pequeno ângulo de ataque, sendo que um alto penetramento também é propício ao aparecimento deste tipo de aparta. Verifica-se a sua formação no processamento de materiais frágeis ou com pouca ductilidade, como ferro fundido, o bronze e latão. Contudo, também se verifica aquando da maquinagem de materiais dúcteis em que a fricção entre a ferramenta e a peça é alta, criando um mau acabamento superficial [6, 11].

- Aparta contínua regular

Trata-se de uma aparta formada por um segmento contínuo de material, associada à deformação plástica contínua sem fratura à frente da aresta de corte. Estas apartas são geradas normalmente na maquinagem de materiais dúcteis, como o alumínio, a altas velocidades de corte e baixos avanços e penetramentos, oferecendo uma qualidade superficial elevada após maquinagem. Tem tendência a formar-se quando o atrito é baixo. Isto significa que o desgaste da ferramenta será menor, aumentando assim o seu tempo de vida e diminuindo também a energia necessária ao corte. De forma a garantir este tipo de aparta, é usual recorrer-se à utilização de lubrificantes e líquidos de refrigeração.

- Aparta contínua irregular

É também possível o aparecimento de uma variante do tipo de aparta contínua, designada por aparta contínua com bordo aderente (*BUE – Built Up Edge*). Verifica-se o surgimento da mesma, na maquinagem de materiais dúcteis a baixas velocidades de corte, com excesso de fricção entre ferramenta e peça, por falta de refrigeração, por exemplo, o que cria um aumento de temperatura na zona de contacto entre estes [3, 6, 11].

- Aparta serrilhada

Este é um tipo de aparta semi-contínua, caracterizada por possuir um perfil semelhante a um dente de serra. A principal razão para o aparecimento desta aparta é uma alternância entre altas e baixas deformações de corte. Normalmente, forma-se em materiais difíceis de maquinar a altas velocidades, como as ligas de titânio, superligas à base de níquel e aços inoxidáveis austeníticos [6].

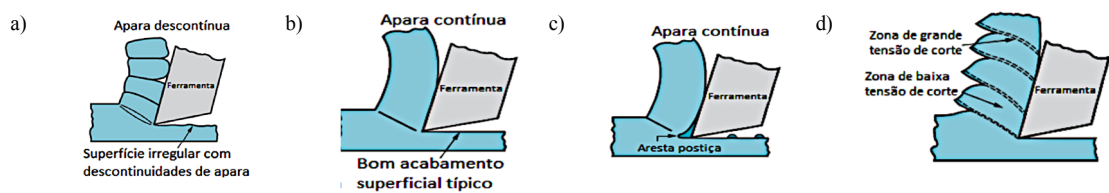


Figura 2.4- Classificação do tipo de apara: a) apara descontinua; b) apara contínua; c)apara contínua com formação de aresta postiza de corte; d) apara serrilhada [6].

Na Tabela 2.1 encontra-se sintetizados os diferentes tipos de aparas obtidos em função do material, geometria da ferramenta e parâmetros de corte utilizados.

Tabela 2.1 - Características dos diferentes tipos de aparas [11]

Tipo de apara	Tipo de material	Ângulo de ataque	Penetramento	Velocidade de corte
Descontinua	Frágeis	Baixo	Alto	Baixa
Serrilhada	Difícil maquinagem	Irrelevante	Irrelevante	Alta
Contínua	Dúcteis	Alto	Baixo	Alta
Contínua BUE	Dúcteis	Alto	Baixo	Baixa

Para além desta caracterização da apara, esta pode ser classificada também quanto à sua forma. Na Figura 2.5, abaixo apresentada, estão representadas as formas das aparas geralmente originadas segundo a norma ISO 3685 [3].

Em fita	Tubular	Espiral	Helicoidal em gume	Helicoidal cônica	Em arco	Em lasca	Em agulha
Longa	Longa	Longa	Longa	Longa	Ligada		
Curta	Curta	Curta	Curta	Curta	Fragmentada		
Enrolada	Enrolada		Enrolada	Enrolada			

Figura 2.5 - Tipos de apara consoante a norma ISO 3685 [3].

Existem oito formas de apara: a apara lisa ou de fita, que se pode tornar indesejável, uma vez que apresenta grande volume e dificuldade na evacuação, a apara helicoidal verifica-se o contrário, já que são produzidos reduzidos volumes e de fácil escoamento, sendo então uma forma de apara desejável, o mesmo acontece para a apara em espiral. A apara em lascas é preferível quando houver um espaço reduzido disponível para a evacuação ou quando a sua remoção for forçada por ação de um fluido de corte [3].

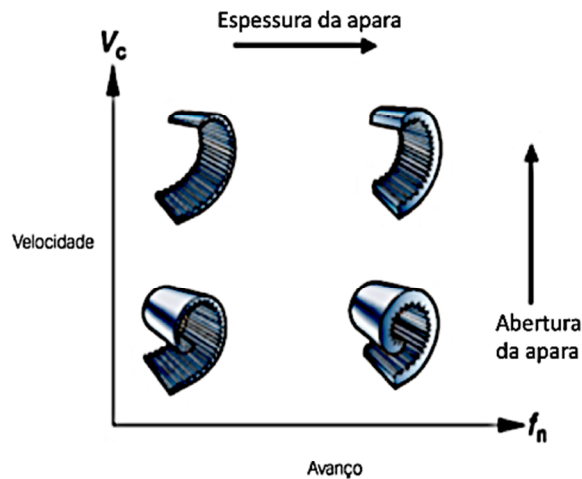


Figura 2.6 - Relacionamento da geometria da para em função do avanço e da velocidade de corte [4].

No gráfico da Figura 2.6 é apresentada a evolução da geometria da apara em função da velocidade de corte (V_c) e do avanço (f_n) dado à ferramenta, durante o processo de corte. Verifica-se assim que o aumento do avanço permite alcançar aparas de maior espessura, enquanto que a diminuição da velocidade de corte favorece o enrolamento da apara [3].

2.5 Operações de corte

Dentro do processo de maquinagem convencional encontram-se vários processos utilizados na remoção de material, sendo este se traduz num movimento relativo entre a ferramenta e a peça, que é caracterizado pelos parâmetros apresentados adiante na Secção 2.6.

Apresentam-se assim como exemplos desta forma de maquinagem, processos como o corte, a furação, o torneamento (Figura 2.7 a)), o aplainamento, a fresagem (Figura 2.7 b e c)), a brochagem e a retificação [6].

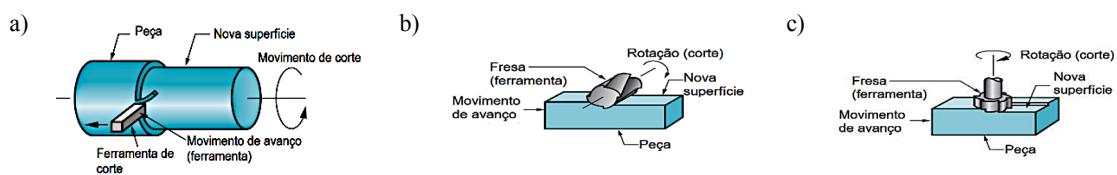


Figura 2.7 - Operações de maquinagem: a) Torneamento; b) Fresagem cilíndrica; c) Fresagem de topo [6].

2.6 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte controlam o movimento relativo entre a peça e a aresta de corte da ferramenta. Destes movimentos destacam-se o movimento de corte, movimento de avanço e o movimento efetivo de corte, que são responsáveis pela formação de apara. Existem ainda movimentos de penetramento, ajuste e de posicionamento [3, 9].

Aquando de uma operação de maquinagem, é necessário definir a solução que maximiza a produtividade em função dos custos e da qualidade superficial pretendida. O movimento relativo entre a ferramenta e a peça é geralmente descrito através de três parâmetros principais de corte, sendo que, destes parâmetros, será sempre obrigatória a definição de pelo menos dois deles, que sejam independentes [5, 6].

O movimento de corte corresponde ao movimento entre a peça e a ferramenta que origina uma única remoção de apara durante uma rotação ou curso, mas que por si só não permite a remoção de novas porções de material. Como parâmetros de corte consideram-se a velocidade de corte (V_c), que é a maior das velocidades relativas da ferramenta ou peça, o avanço (f_n) que corresponde à distância percorrida pela ferramenta por rotação ou curso e penetramento ou profundidade de corte (a_p). Estes parâmetros são dependentes da operação de maquinagem pretendida, da ferramenta de corte, da geometria, das propriedades do material a maquinar e da ferramenta, tendo por base a relação entre produtividade e qualidade superficial pretendida para a peça. O movimento efetivo de corte é resultado da composição dos dois movimentos anteriores (movimento de corte e movimento de avanço), realizados simultaneamente [3, 9, 12].

Um conceito de real importância do processo de maquinagem é a taxa de remoção do material (*MRR – Material Removal Rate*), geralmente descrita em mm³/s ou mm³/rot e é obtida pela multiplicação destes três parâmetros de corte, tendo o torneamento como referência:

$$MRR = V_c \cdot a_p \cdot f_n \quad (2.6)$$

Um ajuste entre os parâmetros de corte permite distinguir dois métodos com características distintas: maquinar em desbaste e maquinar em acabamento. No primeiro método, o processo é caracterizado pela remoção de grandes quantidades de material num curto período de tempo; para tal o avanço e penetramento deverão ser altos e a velocidade de corte mais baixa, no segundo processo são requeridos avanços e penetramentos baixos e velocidades de corte elevadas. Assim a quantidade de material removida é baixa, sendo possível a obtenção das dimensões, tolerâncias e acabamentos superficiais desejados.

Conclui-se assim que os parâmetros de corte devem ser ajustados, de modo a que se obtenha a qualidade superficial exigida no acabamento e no caso de desbaste, que o volume material removido da peça por unidade de tempo (*Material Removal Rate*) seja tanto maior quanto possível, de modo a que este processo apresente máxima rentabilidade [12].

2.7 Ferramentas de corte

O processo de maquinagem é significativamente influenciado pela seleção dos parâmetros relativos à ferramenta de corte, como o material, geometria, posição relativa à peça, ângulo de ataque, entre outros. Tais parâmetros requerem especial atenção já que, no caso de

existir uma ferramenta que realize um número reduzido de operações, irá dar à peça um maior valor acrescentado, o que pode trazer consequências económicas desvantajosas.

2.7.1 Geometria

A geometria das ferramentas de corte tem grande influência no processo de formação de apara, uma vez que condiciona o tipo de apara formada, a distribuição das temperaturas e as forças de corte sobre a ferramenta. Além disto, a configuração geométrica da ferramenta influencia significativamente os parâmetros de corte e o acabamento superficial.

De uma maneira geral, as ferramentas para maquinagem podem ser classificadas de acordo com o número de arestas de corte que apresentam. Assim, no caso de apresentarem apenas uma aresta de corte, são denominadas monofilares (Figura 2.8 a)) (características no processo de torneamento); se apresentarem mais que uma aresta de corte são classificadas como multifilares (Figura 2.8 b)).

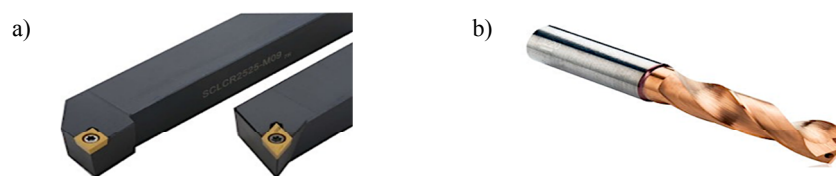


Figura 2.8- a) Ferramenta monofilar; b) Ferramenta multifilar [13].

Na Figura 2.9 ilustra-se as designações das várias faces e arestas de uma ferramenta monobloco, podendo ser traduzidas para ferramentas multifilares e insertos [6].

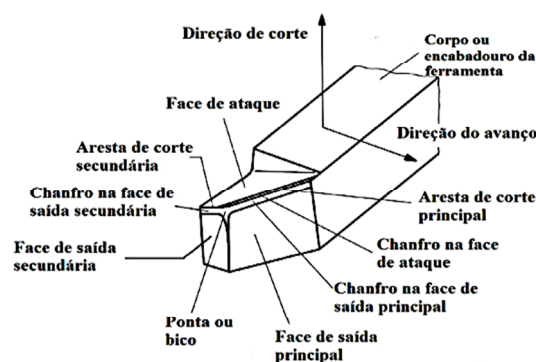


Figura 2.9 - Geometria da ferramenta de corte [3].

Uma ferramenta de corte é constituída por duas zonas perfeitamente diferenciadas: o corpo e a parte ativa. Relativamente à parte ativa da ferramenta de corte, podem-se salientar as seguintes designações fundamentais que permitem uma melhor caracterização e perceção do processo de corte, como ângulo de saída (α), ângulo de gume (β), ângulo de ataque (γ), ângulo de posição de aresta (κ), ângulo de inclinação da aresta (λ), o ângulo de ponta (ϵ) e raio de curvatura da ponta (r).

O ângulo de posição da aresta de corte determina o comprimento de contacto da ferramenta com o material base a maquinar, sendo assim responsável por definir qual a largura e espessura de corte. Quanto menor for o ângulo de posição, maior será a extensão de contacto e melhor a distribuição de calor por essa mesma extensão. Este facto permite aumentar a vida da ferramenta, contudo agrava a qualidade do acabamento superficial. O ângulo de ponta da ferramenta, representado na Figura 2.10, relaciona-se com o ângulo de posição da aresta principal e secundária. Este deverá ser tanto maior quanto possível, pois favorece a resistência mecânica da ponta da ferramenta [3].

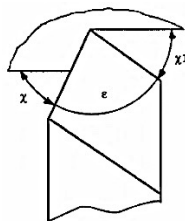


Figura 2.10 - Representação do ângulo de posição da aresta de corte e do ângulo de ponta da ferramenta [3].

O ângulo de ataque da ferramenta traduz-se no ângulo que a face de ataque faz com o plano de referência, podendo este ser positivo ou negativo, tal como é apresentado na Figura 2.11 a). Quanto maior for o ângulo de ataque, menor é a deformação induzida na apana e, consequentemente, menor é o trabalho necessário à sua formação. Enquanto que para ângulos de ataque reduzidos ou até mesmo negativos, verifica-se uma maior deformação plástica da apana, o que favorece a sua fragmentação, sendo que as forças de maquinagem aumentam consideravelmente e podem ocorrer vibrações no processo de corte, desfavoráveis ao tempo de vida da ferramenta e à qualidade superficial do produto maquinado [3].

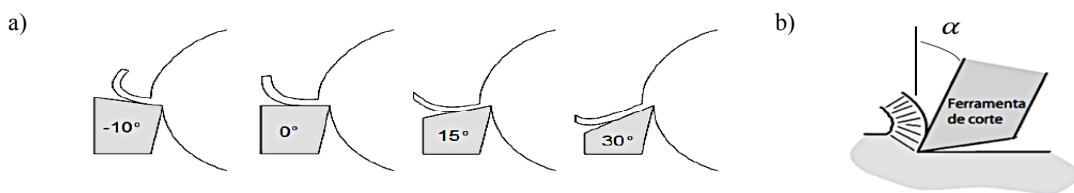


Figura 2.11– a) Diferentes representações do ângulo de ataque da ferramenta; b) Representação do ângulo de saída da ferramenta [6, 14].

O ângulo de saída ou folga (Figura 2.11 b)) é sempre positivo. Por norma, assume os valores entre 2° e 8° . Um ângulo de saída inferior a 2° é considerado pequeno e pode gerar grande interferência entre a face de saída principal e a superfície maquinada, causando um desgaste acentuado na ferramenta. Em situações de maior solicitação pode ocorrer fratura da própria ferramenta, principalmente quando os ângulos de ataque são elevados (superiores a 8°) [3].

O ângulo de inclinação de aresta (λ) é geralmente negativo, para que o ponto de contacto inicial da ferramenta com a peça não seja feito com a aresta menos tenaz (geralmente a de topo), permitindo assim uma maior robustez na ferramenta e no processo, sendo que, com um ângulo

de inclinação positivo, a apara afasta-se da peça e, com um ângulo de inclinação negativo, a apara flete e atrita sobre a peça.

O ângulo de gume (β), apresentado na Figura 2.12 a) é medido entre a face de ataque e a face de saída. Quanto menor for este ângulo, maior será a facilidade da ferramenta em fazer o penetramento e, conseqüentemente, maior facilidade na remoção do material. O raio de curvatura da ponta da ferramenta de corte (Figura 2.12 b)) influencia o acabamento superficial, a forma da apara e a resistência da ferramenta de corte. Um raio de ponta pequeno é ideal para baixas profundidades de corte, e reduz a vibração a que a ferramenta está sujeita, contudo reduz a resistência da ferramenta. Quando o raio da ferramenta é grande, implica a utilização de ferramentas robustas, conseguindo-se grandes avanços e grandes profundidades assim como são garantidas espessuras médias da apara reduzidas. Os melhores acabamentos superficiais são garantidos quando são utilizados raios de ponta da ferramenta maiores [3, 4, 15].

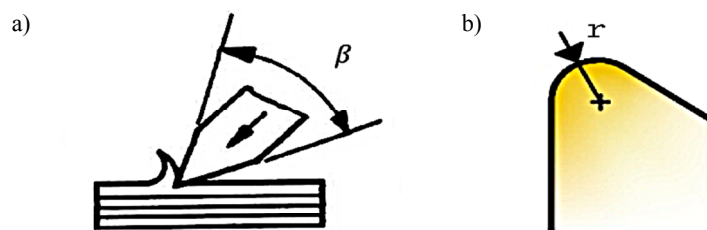


Figura 2.12 - Representação do ângulo de gume da ferramenta a) e do raio da ferramenta b) [4, 15].

2.7.2 Características

Tendo em conta o material a maquinar, as propriedades requeridas nas ferramentas podem variar bastante consoante a aplicação, já que durante a operação de corte, uma ferramenta está sujeita a altas temperaturas e tensões, podendo também trabalhar em choque para o caso de maquinagem intermitente. Desta forma, uma ferramenta deve verificar um conjunto de atributos para que possa garantir um bom funcionamento. Dessas características destacam-se [3, 5]:

- Resistência ao desgaste elevada (elevado tempo de vida);
- Dureza a frio e a quente (resistência ao calor gerado no processo);
- Condutividade térmica elevada (capacidade para dissipar ou conduzir o calor gerado);
- Tenacidade elevada;
- Quimicamente inerte (ter pouca ou nenhuma afinidade química com o material a maquinar);
- Coeficiente de atrito baixo (reduzir esforços de corte e geração de calor por fricção);
- Coeficiente de dilatação térmica baixo (minimizar variações dimensionais com impacto nas tolerâncias das peças maquinadas).

2.7.3 Materiais para as ferramentas

Atualmente, existem seis grupos de materiais que podem ser considerados na escolha de uma ferramenta para maquinagem: aços rápidos, ligas fundidas, carbonetos sinterizados, cermetes, cerâmicos, e materiais ultra-duros. Cada um destes materiais apresentam uma aplicabilidade diferente em função das suas características, no gráfico da Figura 2.13 é apresentada a distribuição dos materiais em função da sua tenacidade e dureza. Na Tabela 2.2 é feita uma síntese das propriedades mecânicas dos materiais utilizados nas ferramentas de corte.

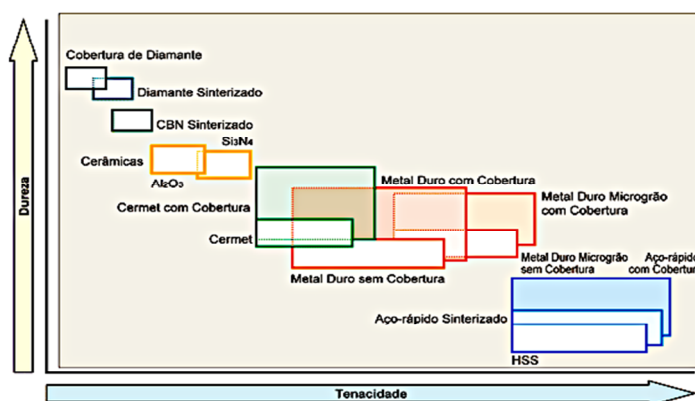


Figura 2.13 - Distribuição das categorias dos materiais das ferramentas de corte em função da sua dureza e tenacidade [16].

Tabela 2.2 - Propriedades das categoriais de materiais utilizados nas ferramentas de corte [3]

Material	Dureza (HV)	Tensão de Ruptura Transversal (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Condutibilidade térmica ($W/m \cdot K$)
Aço rápido	700-900	2500-4000	2.6-3	15-48
Carbonetos sinterizados	1200-1800	1300-3200	4.7 - 6.5	20-80
Si3N4	1350-1600	600-900	2.8-3.2	20-35
Al2O3	1450-2100	400-800	3-4.5	10-38
CBN	3500-4000	500-800	6.8	100
PCD	5000-6000	600-1100	8.4	550

À medida que são feitos avanços no desenvolvimento de novos materiais, as velocidades de corte máximas vão aumentando, conforme é descrito no gráfico da Figura 2.14- Verifica-se assim que os materiais ultra-duros são os que suportam trabalhar a elevadas velocidades.

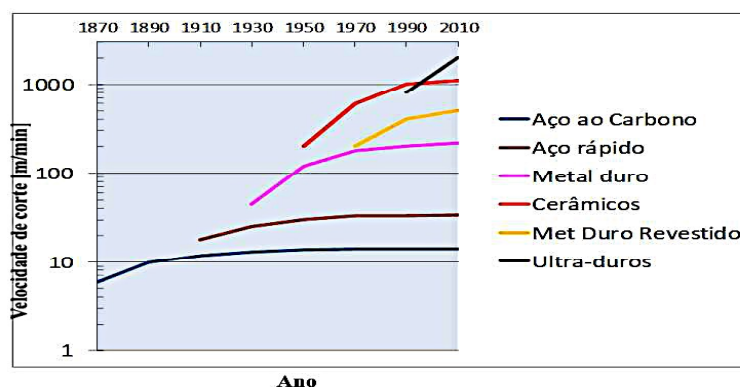


Figura 2.14- Evolução da utilização dos materiais nas ferramentas de corte [6].

2.7.3.1 Aços rápidos (HSS – High Speed Steel)

Aço rápido é o nome dado a um conjunto de aços de alta performance com alto teor de elementos de liga, de modo a garantir elevada dureza a quente até temperaturas de cerca de 500°C, o que permite velocidades de corte mais elevadas. Os elementos de liga mais comuns nestes aços são o tungsténio, o molibdénio, o vanádio e o crómio, sendo também possível a adição de cobalto. A alta resistência ao desgaste destes aços deve-se à formação de carbonetos por parte dos elementos de liga adicionados. Estes materiais são usualmente fabricados por processos de metalurgia convencionais, como o forjamento, ou por processos de metalurgia dos pós [3].

De acordo com a AISI, os aços rápidos podem ser divididos em duas categorias fundamentais, consoante o principal elemento de liga:

- grupo T, para aços rápidos ao tungsténio;
- grupo M, para aços rápidos ao molibdénio.

Tabela 2.3 - Composição química e dureza dos aços rápidos do grupo T e M [3]

Qualidades	Composição química (%peso) aproximada						Dureza (HB)
	C	Cr	Mo	W	V	Co	
Ao Tungsténio							
T1	0.75	4	-	18	1	-	823
T2	0.8	4	-	18	2	-	823
T4	0.75	4	-	18	1	5	849
T5	0.8	4	-	18	2	8	869
T6	0.8	4.5	-	20	1.5	12	969
T15	1.5	4	-	12	5	5	890
Ao Molibdénio							
M1	9.8	4	8	1.5	1	-	823
M2	0.85	4	5	6	2	-	836
M4	11.3	4	4.5	5.5	4	-	849
M15	1.55	4.5	4.1	6.5	5	5	869
M34	0.9	4	8	2	2	8	869
M42	1.1	3.75	9.5	1.5	1.12	8	897

O tungsténio forma carbonetos complexos com o ferro e o carbono, contribuindo significativamente para a resistência ao desgaste. No entanto, o tungsténio como elemento de liga em aços rápidos, tem vindo a ser cada vez mais substituído pelo molibdénio, dado que este elemento é capaz de formar os mesmos carbonetos duplos e tem metade do peso atómico do tungsténio, o que significa que se pode substituir cada duas partes de tungsténio com uma parte de molibdénio. Da análise à Tabela 2.3 verifica-se que os aços do tipo M apresentam tenacidade maior que do tipo T, contudo a sua dureza a quente é um pouco mais baixa, podendo ser compensada com a adição de mais tungsténio [7].

O crómio, sempre que presente nos aços, melhora o compromisso entre dureza e tenacidade. As maiores durezas são conseguidas com a adição de cobalto, como é o caso dos aços M35 e M42, por exemplo. Este tipo de aços é indicado para a maquinagem em desbaste a elevada velocidade, devido à sua dureza a quente. Aços rápidos T5, T6 e T15 são caracterizados por uma grande resistência ao desgaste e dureza a quente, sendo que são utilizados para ferramentas de

elevado poder de corte. Deve dar-se destaque ao aço rápido M2 devido à sua excelente tenacidade e baixo custo e ainda ao M42 pela qualidade apresentada em desbastes elevados [3].

A tendência destes materiais é a aplicação de revestimentos ou o uso de pastilhas indexáveis de materiais com melhores características, bem como o recurso ao fabrico por metalurgia dos pós, como referido anteriormente, o que melhora significativamente as suas propriedades, dada a distribuição mais homogênea e o menor diâmetro dos carbonetos. A sua limitação está associada ao facto de as velocidades de cortes e avanços admissíveis serem bastante inferiores aquelas que são verificadas para as ferramentas em carbonetos sinterizados, que implica um aumento do tempo de maquinagem de um dado produto, e consequentemente diminui a produtividade [3].

2.7.3.2 Ligas fundidas

Este tipo de materiais é também conhecido por estelites e obtém-se da fundição a temperaturas de 2800°C de uma liga composta por elemento como cobalto, que soma cerca de 38 a 53% da composição, contando também com a presença de crómio (cerca de 30 a 32%), tungsténio (cerca de 10 a 18%) e elementos de baixa percentagem com carbono, azoto e manganês. Após a fundição, estes materiais podem ser sujeitos a um processo de retificação [3].

Comparativamente aos aços rápidos (HSS), podem trabalhar com velocidades de corte superiores, uma vez que garantem elevada dureza obtida após vazamento e uma resistência ao desgaste também superior, contudo têm menor tenacidade que os HSS. Nos dias que correm, não apresentam grande utilização industrial dados os avanços no desenvolvimento de insertos cerâmicos, revestimentos e materiais ultra-duros.

2.7.3.3 Carbonetos sinterizados (metal duro)

Atualmente na indústria, as ferramentas em carbonetos sinterizadas apresentam uma utilização muito significativa e tal é devido à sua dureza, tanto a frio como a quente, à sua tenacidade e resistência ao desgaste. A este tipo de materiais é também usual denominar-se por metal duro. Estas características podem ser obtidas em função das matérias base da ferramenta, uma vez que são formadas por dois constituintes: carbonetos duros e aglomerantes [3, 6].

Os carbonetos duros são caracterizados por serem muito duros e de elevada resistência ao desgaste. Usualmente, utiliza-se o carboneto de tungsténio (WC) que pode aparecer só ou acompanhado de elementos como carboneto de vanádio (V_4C_3), Carboneto de nióbio (NbC) e o carboneto de tântalo (TaC). O tamanho de grão dos pós de tungsténio pode influenciar a dureza do material, aumentando com a diminuição do diâmetro deste.

O elemento aglomerante tem como função ligar as partículas duras, sendo o elemento de maior destaque, o cobalto. A sua percentagem tem influência direta na tenacidade do produto

final, sendo tanto maior, quanto maior a percentagem do elemento. É de salientar também que o aumento da percentagem de cobalto presente provoca uma diminuição da dureza do material.

Segundo a norma ISO os carbonetos sinterizados podem ser classificados de acordo com os grupos apresentados na Tabela 2.4. Na Tabela 2.5 são apresentadas as propriedades mecânicas relevantes destes materiais.

Tabela 2.4 - Classificação dos carbonetos sinterizados

Grupo	Materiais a maquinar	Apara gerada
P	Materiais ferrosos	Longas e dúcteis
M	Materiais ferrosos	Longas ou curtas
K	Ferro fundido, ligas de alumínio, materiais não metálicos	fragmentadas
N	Alumínio, latão, cobre	-
S	Superligas de níquel, cobalto e titânio.	-
H	Materiais de alta dureza (aços endurecidos)	-

Tabela 2.5 - Composição química e propriedades para metais duros [3]

Designação	Composição química aproximada (%)			Dureza (HV)	Tensão de rotura transversal (MPa)	Módulo de Young (GPa)
	WC	TiC + TaC	Co			
P01	30	64	6	1500	750	-
P10	55	36	9	1600	1400	5.2
P20	76	14	10	1500	1500	5.4
P25	73	19	8	1500	1700	5.5
P30	82	8	10	1450	1700	5.6
P40	77	12	11	1400	1800	5.6
P50	70	14	16	1300	2000	5.2
M10	84	10	6	1650	1400	5.8
M20	82	10	8	1550	1600	5.6
M30	81	10	9	1450	1800	5.8
M40	78	7	15	1300	2000	5.5
K01	93	2	5	1750	1200	6.3
K05	92	2	6	1700	1350	6.3
K10	92	2	6	1650	1500	6.3
K20	91.5	2.5	6	1550	1700	6.2
KK30	89	2	9	1450	1900	-
K40	88	-	12	1300	2100	5.8

2.7.3.4 Cermets

Os “Cermets” são materiais agregados de cerâmica numa matriz metálica, daí resulta o nome Cermets: **cer**âmico e **meta**is. A sua estrutura parte da adição de agregados cerâmicos, sob a forma de carbonetos (TiC, TiN ou TiCN), a uma matriz metálica de cobalto, níquel ou molibdénio.

As principais características deste material prendem-se com a sua grande estabilidade química, a sua alta dureza a quente e a baixa tendência ao desgaste por oxidação. Atualmente, a maior parte dos insertos para ferramentas de corte são em carbonetos sinterizados revestidos com cerâmicos.

Os Cermets são capazes de trabalhar a elevadas velocidades de corte, o que permite alcançar um melhor acabamento superficial, pelo que acabam por ser muito vantajosos em operações de acabamento e semi-acabamento. São excelentes para aplicações onde as tolerâncias sejam muito apertadas e haja a necessidade de uma elevada qualidade superficial e de estabilidade dimensional [6].

2.7.3.5 Cerâmicos

A grande vantagem das ferramentas em materiais cerâmicos, em relação às ferramentas metálicas e de carbonetos, é a sua capacidade de suportar temperaturas muito elevadas, apresentando ainda excelente dureza e uma boa condutividade térmica. As maiores desvantagens são a sua fragilidade e fraca resistência ao choque térmico, sendo por isso usados em processos contínuos e de longo prazo [17].

Os materiais mais comuns são a alumina (Al_2O_3), o nitreto de silício (Si_3N_4), SIALON ($SiN - Al_2O_3$). Nesta classe de materiais é usual encontrarem-se cerâmicos reforçados com fibras de carboneto de silício, também designados de *whiskers* [3, 4].

Tabela 2.6 - Propriedades dos cerâmicos [18]

Material	Dureza (HV)	Cond. Térmica (\cdot $10^6 W/m \cdot K$)	Coef. Expansão térmica ($W/m \cdot K$)	Tenacidade ($MPa \cdot \sqrt{m}$)
Alumina	1860-2160	16.9 – 29.1	6.2-6.4	4.3
Nitreto de silício	1520-1680	14.4 – 15.6	3.3	5
SIALON	1650-1890	18 – 23	3.5	5.1
Fibras de SiC	120-150	115 - 140	17	19

Da análise feita à Tabela 2.6, constata-se que estes materiais são normalmente usados para maquinagem de superligas resistentes ao calor, principalmente para a indústria aeroespacial, como os aços duros, titânio e ferro fundido. Este tipo de material utiliza-se sobretudo em operações de acabamento em fresagem e maquinagem em ambientes quimicamente reativos [6, 17].

2.7.3.6 Ultra-duros

Os materiais ultra-duros para ferramentas estão divididos em duas categorias: o CBN e PCD. A sua extrema dureza, justifica o facto do custo destes materiais ser muito elevado, podendo ir até cerca de 30 vezes mais que os insertos de carbonetos.

2.7.3.6.1 CBN – Nitreto de boro cúbico

O nitreto de boro cúbico é resultado da compactação a altas pressões (8GPa) e temperaturas (1500°C) de grãos finos de nitreto de boro e um material metálico, que corresponde ao aglomerante. O material pode ser fornecido sobre a forma de inserto ou como revestimento do substrato de carbonetos. Trata-se de um material que, além de ser extremamente duro, apresenta vantagens como elevada condutividade térmica que permite um fácil escoamento do calor do processo através da ferramenta, baixa afinidade com os aços a elevadas temperaturas e elevada estabilidade química [3].

O material é empregue na maquinagem de materiais com elevadas durezas, essencialmente superligas de níquel e aços de elevada dureza, utilizado a rotações elevadas (elevado desgaste com baixas velocidades) [3, 19].

2.7.3.6.2 PCD – Diamante policristalino

Neste tipo de ferramentas é utilizado o mais duro dos materiais: o diamante. Este foi introduzido no mercado no início da década de 80, tendo revolucionado o processo de fabrico de ferramentas de corte [20].

As excelentes características deste material resultam da aplicação de uma fina camada de diamante de espessura variável entre 0.5 e 1 mm, composta por partículas entre os 10 e os 40 µm. A aproximadamente 1.500°C e a uma pressão aproximada de 60 kbar, através de um processo de sinterização, verifica-se a junção de diamante sintético a um substrato de metal duro (geralmente o cobalto). Age como um catalisador e causa uma intensa alteração estrutural nas partículas individuais do diamante, dando origem a um material de corte com as propriedades combinadas do metal duro e do diamante.

As características (e preços) das peças em PCD são influenciadas por diversos fatores como os tamanhos de grãos na microestrutura dos diamantes e espessuras do substrato, de tal forma que são registadas durezas com valores muito superiores àquelas que são verificadas para os carbonetos sinterizados. Verifica-se a existência de uma relação inversa entre resistência ao desgaste e dureza (garantida pelo diamante) e tenacidade da ferramenta (oferecida pelo substrato em metal duro). Desta forma, ferramentas de PCD, contendo partículas de diamantes mais grosseiras são mais resistentes ao desgaste, contudo são menos tenazes. Por outro lado, ferramentas de PCD com partículas de diamante de dimensões inferiores são tenazes, sendo que apresentam uma resistência ao desgaste mais baixa [21, 22, 23].

Desta forma, dependendo da funcionalidade, pode ser feito um ajuste destas características das ferramentas em função do material do substrato ou tamanho das partículas de diamante, obtendo a melhor relação qualidade/preço possível. Contudo, deve ser tido em conta que nos materiais onde se verifique a geração de grande quantidade de calor na interface a ferramenta, deve evitar-se a utilização do PCD, uma vez que o diamante tende a transformar-se

em grafite. Desta forma, a sua utilização é limitada maioritariamente a ligas de alumínio e a materiais extremamente abrasivos [22].

Tendo em conta as características do PCD torna-se difícil proceder à sua maquinagem, de modo a conferir-lhe a geometria requerida. Assim, uma vez que os métodos de retificação tradicionais não eram adequados, novos métodos foram desenvolvidos e refinados até às soluções verificadas nos dias de hoje, capazes de oferecer excelentes resultados. A retificação com partículas de diamante, eletroerosão por fio e a tecnologia de corte por *laser* agora são processos habituais na maquinagem destes materiais. A grande vantagem da maquinagem por eletroerosão por fio é a capacidade de cortar qualquer material, independentemente da dureza, desde que este seja condutor de eletricidade, o que no caso das ferramentas em PCD é assegurado pelo elemento ligante do substrato, geralmente cobalto. A operação de retificação confere um melhor acabamento superficial às faces expostas. Existe a possibilidade de combinar dois processos num único disco de retificação, onde o disco de diamante retifica a peça e um anel de grafite, à volta do disco, serve como ferramenta para a eletroerosão. No entanto, devido à natureza dos cristais de PCD, as ferramentas da eletroerosão e retificação têm tendência a passar à volta ou arrancar completamente certas partículas, em vez de as cortar, o que causa alterações na rugosidade da aresta de corte, podendo também criar lascas microscópicas nesta e, eventualmente, lascas macroscópicas. Isto leva a um pior desempenho da ferramenta em termos de acabamento superficial, diminuindo também a vida desta [23, 24, 25].

No caso da retificação, os diamantes são completamente arrancados, sendo o raio da aresta de corte limitado pelo desgaste do disco de retificação. Já a eletroerosão afeta apenas o elemento ligante, uma vez que o diamante não é condutor de eletricidade. Ou seja, as partículas de diamante são soltas pela remoção do ligante, sendo o raio da aresta de corte limitado pelo diâmetro do fio. Vários estudos têm sido feitos com o objetivo de melhor compreender a qualidade dos insertos em PCD fabricados por maquinagem a *laser*, sendo de notar que os tempos de processamento para insertos em PCD fabricados por maquinagem a *laser* são geralmente menores que os fabricados por retificação ou eletroerosão. Neste mesmo estudo verificou-se que o desgaste da ferramenta para ambos os casos é praticamente idêntico, apesar da qualidade superficial ser melhor para o caso da ferramenta maquinada a *laser*, com uma rugosidade cerca de 20% menor. A Figura 2.15 ilustra o estado das superfícies do PCD em função do processo utilizado para obtenção da forma final [23, 24, 26].

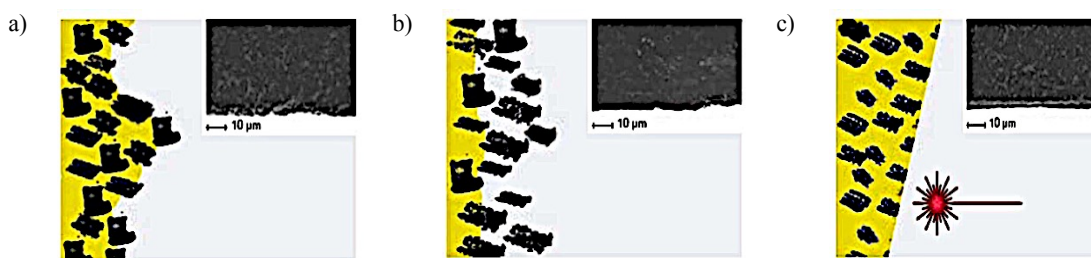


Figura 2.15 - Superfície de PCD obtidas pelos diferentes processos de fabrico: a) Retificação; b) Eletroerosão; c) *Laser* [24].

Assim, o uso de *laser* para maquinagem das ferramentas em PCD é uma alternativa muito competitiva, uma vez que este facilmente evapora a camada de diamante e corta o substrato, produzindo uma aresta de corte muito afiada sem lascas ou protuberâncias dos cristais de diamante, com raios entre 2 e 3 micrómetros, e raios interiores de pelo menos 15 micrómetros. O facto da aresta de corte ser mais afiada aumenta a vida da ferramenta, além de assegurar um melhoramento ao nível da qualidade superficial da peça maquinada. Uma das grandes vantagens da maquinagem a *laser* destas ferramentas é a capacidade de produzir quebra-aperas sem quaisquer limitações na geometria pretendida, sendo possível obter tolerâncias na casa dos micrómetros e raios mais pequenos em arestas interiores. Também os custos de operação são menores, uma vez que não existe desgaste da ferramenta de corte [25].

Uma variante do processo de retificação por *laser* é a tecnologia *Laser MicroJet* desenvolvida pela empresa *Synova S.A.*. Esta utiliza um fio de água, com poucos micrómetros de espessura, responsável por guiar o *laser* através de reflexão total interna. É um processo que garante excelentes resultados, devido à mínima perda de material. Além de ser utilizado na retificação do PCD, é também utilizado no corte de dentes de serra e processamento com alta precisão de peças de trabalho finas sensíveis à deformação por calor [27].

O uso da tecnologia *Laser MicroJet* tem como vantagem a obtenção de uma melhor qualidade superficial, devido à praticamente inexistente zona afetada pelo calor, sendo possível obter valores abaixo de 0.3 micrómetros na rugosidade superficial, o que elimina a necessidade de operações adicionais de acabamento [27].

2.7.4 Revestimentos

O revestimento de uma ferramenta de corte não é mais do que uma camada protetora aplicada à superfície do elemento. Assim, garante-se o aumento da dureza superficial da ferramenta, mantendo a tenacidade do substrato, alcançando-se uma maior resistência ao desgaste, proteção térmica e estabilidade química [19].

Além de diminuir o desgaste da ferramenta, este tipo de tratamento permite também melhorar a qualidade superficial do material maquinado, inibir reações químicas entre o substrato e o material a maquinar, além de reduzir a quantidade de lubrificante utilizado no processo, uma vez que há diminuição do coeficiente de atrito, levando à diminuição de forças de maquinagem envolvidas. O revestimento funciona também como isolante térmico, fazendo com que o calor resultante seja transferido para a limalha, ao invés deste ser transmitido para a própria ferramenta. Esta redução de calor, gerado entre a ferramenta e o material a maquinar, permite maximizar a eficiência do processo [3, 5].

Com a utilização de revestimentos garante-se um aumento da vida da ferramenta, assim como o aumento das gamas de velocidades de corte possíveis de serem utilizadas. Este método é aplicado essencialmente em carbonetos sinterizados, podendo também ser aplicados em aços

rápidos, cermetes e cerâmicos. Vários estudos têm vindo a ser desenvolvidos, o que permitiu aumentar o conhecimento acerca dos diferentes revestimentos a utilizar, além de permitir fazer uma correta caracterização das vantagens introduzidos por cada um deles. Assim apresentam-se de seguida na Tabela 2.7 alguns dos materiais utilizados como revestimentos, e as respetivas características, que se encontram atualmente disponíveis no mercado[3, 4, 5, 28]:

Tabela 2.7 - Revestimentos utilizados em ferramentas de corte, as suas características e aplicações

Revestimento	Características	Aplicação
TiC (carboneto de titânio)	Boa resistência ao desgaste; Elevada dureza; Boa estabilidade química.	Aplicado em carbonetos sinterizados
TiCN (carbonitreto de titânio)	Boas propriedades de adesão; Mais duro do que TiN; Resistência ao desgaste de flanco.	Aplicado em materiais difíceis de maquinar tais como aços rápidos e materiais abrasivos.
TiN (nitreto de titânio)	Baixa dureza; Baixo coeficiente de atrito baixo; Resistência formação de crateras de desgaste.	
AlTiN (nitreto de alumínio-titânio)	Elevada tenacidade; Boa resistência à oxidação; Elevada dureza a quente; Boa ductilidade; Baixa condutividade térmica.	É utilizado para maquinagem a elevadas velocidades de corte e elevados avanços.
TiAlN (nitreto de alumínio-titânio)	Dureza ligeiramente inferior ao AlTiN; Combinação de dureza com resistência à oxidação. Boa resistência ao desgaste.	
AlCrN (nitreto de alumínio-crómio)	Elevada resistência ao desgaste; Baixo coeficiente de atrito; Boa dureza a quente.	
CrN (nitreto de cromo)	Boa combinação de resistência ao desgaste, corrosão e oxidação; Baixo coeficiente de atrito; Boa tenacidade e ductilidade.	Trata-se de um revestimento utilizado para a maquinagem de ligas de alumínio e aços de baixa liga.
Al₂O₃ (alumina ou óxido de alumínio)	Elevada dureza; Boa resistência ao desgaste; Quimicamente inerte; Baixa condutividade térmica; Resistente à formação de crateras;	
Diamante	Elevada dureza; Elevada resistência ao desgaste; Difusão química com materiais que contenham carbono; Coeficiente de atrito muito baixo.	Este tipo de revestimento é aplicado na maquinaria de cobre, latão e ligas de titânio, alguns polímeros e ainda aluminos com baixo teor de silício.

Além dos revestimentos acima apresentados é de salientar a existência de outros materiais como DLC (Diamond-like Carbon), TiB₂ (diboreto de titânio), TiSi (silicato de titânio), NbC

(carboneto de nióbio) e TaC (carboneto de tântalo) que apesar de terem uma menor aplicabilidade tem vindo a ser testados e desenvolvidos. No gráfico da Figura 2.16 é apresentada uma comparação entre a resistência ao desgaste por cratera ou por flanco por parte dos materiais utilizados como revestimentos [4, 5, 28].

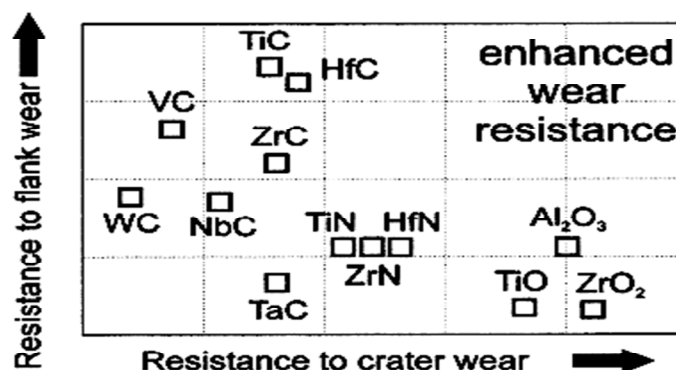


Figura 2.16- Comparação dos revestimentos em função da sua resistência ao desgaste no flanco e de cratera [29].

No que diz respeito às metodologias utilizadas para a aplicação dos revestimentos, podem encontrar-se tecnologias como o PVD, CVD, PACVD e FCVA.

O PVD (*Physical Vapour Deposition*) é um processo de revestimento por vácuo que dá origem a uma fina camada cerâmica de elevada aderência. O processo decorre a temperaturas moderadas (400-600°C). O material metálico a depositar é removido de uma fonte por evaporação, recorrendo a um arco elétrico de elevada potência, reagindo com um gás ativo como nitrogénio, oxigénio ou um hidrocarboneto, formando uma película dura sobre a superfície da ferramenta. Os revestimentos mais usados por este processo, são o TiC, TiN, TiCN [4, 30, 31].

O CVD (*Chemical Vapour Deposition*) é um processo onde se verifica a deposição a partir de reações químicas, que ocorrem na ordem dos 700-1500°C, envolvendo gases precursores com os elementos químicos que compõem o material a ser depositado. Estas partículas atingem o substrato a partir de um movimento aleatório, regido por processos de difusão e/ou convecção de matéria. Uma das grandes vantagens desta técnica tem a ver com a capacidade de aumentar a velocidade de corte, sendo indicados para aplicações severas com altos avanços e velocidades de corte moderadas a elevadas. A gama de temperaturas acaba por limitar os tipos de materiais que podem ser revestidos. Os revestimentos mais usados por este processo, são o TiC, TiN, TiCN e Al₂O₃ [4].

O PACVD (*Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition*) corresponde a um processo misto onde os processos PVD e CVD são combinados de forma sequencial na mesma câmara. Aqui o processo CVD é modificado para ocorrer a temperaturas entre 180 e 350°C. Para que isto seja possível, a decomposição dos gases que geram a camada a ser depositada é ativada por plasma. Esta técnica permite formar camadas de DLC (*Diamond Like Carbon*) que confere ao revestimento elevada dureza e baixo coeficiente de atrito [32].

Por fim, apresenta-se o FCVA (*Filtered Cathodic Vacuum Arc*) que consiste em utilizar uma filtragem eletromagnética dos compostos que serão aplicados na película de revestimento. A remoção de impurezas destes compostos permite a obtenção de revestimentos mais densos e duros. Este processo pode produzir revestimentos de TaC [5, 33].

2.7.5 Construção

Ao nível da construção, as ferramentas de corte podem receber diversas classificações. As ferramentas consideradas de catálogo são ferramentas *standard* que têm como principais características o facto de terem um custo mais baixo e limitação geométrica. Por outro lado, existem ferramentas especiais que necessitam de ser feitas por encomenda. Estas permitem outro tipo de geometrias e complexidade tendo por consequência custos associados mais elevados.

Um outro tipo de avaliação que pode ser feito às ferramentas diz respeito ao seu corpo. Assim encontram-se as seguintes opções [5]:

○ **Pastilhas, insertos ou plaquetas:** Trata-se de um elemento prático, tendo como vantagem o facto de uma pastilha poder contar com várias arestas de corte, o que permite, no caso de desgaste, fazer a rotação da pastilha. A desvantagem prende-se com a necessidade de substituição do corpo da ferramenta, caso o perfil a maquinar se altere. Na Figura 2.17 a) apresentam-se alguns dos diferentes tipos de insertos que podem ser utilizados e o modo como são aplicados, (Figura 2.17 b)).

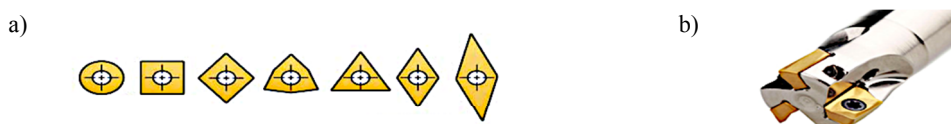


Figura 2.17 – a) Diferentes geometrias de pastilhas de corte; b) Ferramenta com pastilha de corte [4, 6].

○ **Integrais:** Este tipo de ferramentas é feito num único bloco, sendo este trabalhado até que seja obtida a configuração pretendida. Por norma, são fabricadas em aço rápido ou em metal duro. De forma a elucidar acerca do tipo de ferramenta em questão é apresentada na Figura 2.18 a) uma ferramenta integral, neste caso uma broca para metal.

○ **Insertos brasados:** Estes elementos conferem grande durabilidade à ferramenta de corte, além de garantir a obtenção de geometrias muito complexas, tal como a que é apresentada na Figura 2.18 b). Este tipo de ferramentas pode ser reparado fazendo a dessolda do inserto, correção do corpo da ferramenta e fazendo a solda de novo inserto. Os insertos são produzidos por norma em metal duro.



Figura 2.18 - a) Ferramenta de corte integral; b) Ferramenta com insertos brasados [34].

Uma outra forma de análise da construção da ferramenta diz respeito ao modo como esta é fixa à máquina. Assim, a estrutura da ferramenta pode apresentar-se sob duas formas distintas: sem suporte incorporado ou com suporte.

As ferramentas sem suporte têm como principal vantagem a possibilidade de ser adaptadas a suportes distintos e, desse modo, funcionar em máquinas diferentes. São assim consideradas mais versáteis. A principal desvantagem reside no facto de haver uma degradação mais rápida da ferramenta devido à limalha e resíduos que nela se fixam. As ferramentas com suporte incorporado, tal como a que é representada na Figura 2.19 a) têm um custo mais elevado (1.5 a 2 vezes o valor de ferramentas sem suporte incorporado) contudo, constituem um só corpo, o que garante menos vibrações em trabalho, logo verificam-se melhores condições de trabalho [35, 36].

Relativamente à geometria das ferramentas de corte é necessário apresentar o conceito de quebra-aparas, Figura 2.19 b). Este elemento é responsável por reduzir as forças de corte e melhorar o controlo da apara. Consegue-o ao forçar a apara sobre a ferramenta de corte até que a tensão na superfície exterior exceda a tensão de rotura do material, levando à fratura da apara [36].

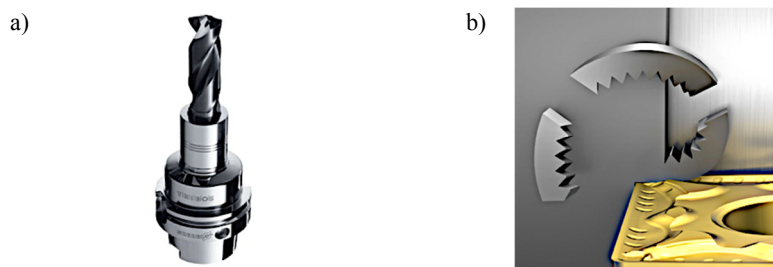


Figura 2.19 - a) Ferramenta de corte de suporte integrado; b) Ferramenta de corte com quebra-apara [4].

Torna-se importante utilizar este elemento quando da maquinagem resultam aparas contínuas longas que podem ser prejudiciais no que diz respeito ao manuseamento e à qualidade superficial da superfície maquinada.

2.7.6 Vida das ferramentas

A vida da ferramenta pode ser entendida como o tempo que a mesma trabalha efetivamente até perder sua capacidade de corte. De modo a verificar o efeito do desgaste sofrido

pelas ferramentas, deverão ser feitas análises à rugosidade superficial e precisão dimensional dos componentes maquinados, às forças e potências de corte e ao tipo de apara gerada.

Para uma caracterização mais completa do tempo de vida das ferramentas é essencial ter o conhecimento do local onde ocorrem as falhas, que tipos de falhas existem e qual a sua causa. À partida, distinguem-se dois grupos que podem levar à degradação da ferramenta: os que originam o colapso de forma abrupta (não controláveis) e os que conduzem à remoção gradual e progressiva de material das zonas da face de ataque e saída da ferramenta (controláveis). É preferível que se dê uma degradação controlada da ferramenta, uma vez que assim é possível corrigir/substituir a ferramenta, alcançando-se melhores resultados no que à economia de maquinação diz respeito.

No caso de o material da ferramenta ser escolhido criteriosamente verifica-se que o desgaste da face de saída é aquele que leva à fixação da vida útil da ferramenta. Para além do material das ferramentas, um outro modo de minimizar o desgaste, é a utilização de parâmetros de corte adequados ao processo. Os gráficos das Figuras 2.20 e 2.21 mostram como varia a vida útil de uma ferramenta de corte em função dos diferentes parâmetros de corte [3, 4].



Figura 2.20 Influência dos parâmetros de corte no tempo de vida da ferramenta de corte. Adaptado de [4].

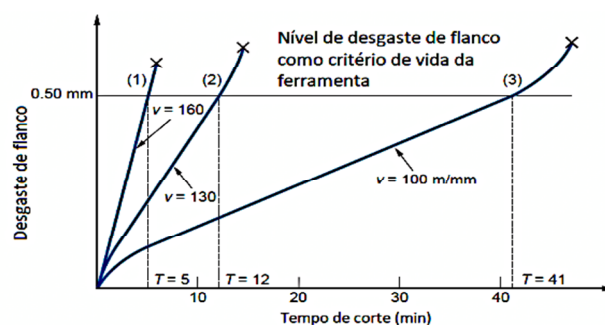


Figura 2.21– Desgaste da ferramenta de corte em função dos parâmetros de corte [6].

A análise de desgaste da ferramenta pode ser feita recorrendo a métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos baseiam-se na medida de perda de material por parte da ferramenta de corte e são consideradas técnicas óticas, apalpadores e resistências elétricas. Os métodos indiretos utilizam a medição de parâmetros relacionados com o desgaste da ferramenta como forma de controlo e utilizam-se análises às variações dimensionais da peça, variação das potências de maquinação, variação da acústica ou temperatura [3].

2.7.6.1 Mecanismos de desgaste

Conhecida a importância da análise do desgaste da ferramenta, torna-se imperativo a análise aos mecanismos de desgaste. Do gráfico da Figura 2.22, destacam-se a abrasão, difusão, adesão e oxidação, como sendo os principais mecanismos responsáveis pelo desgaste na face de ataque e de saída da ferramenta, podendo atuar de forma isolada ou de forma combinada [3].

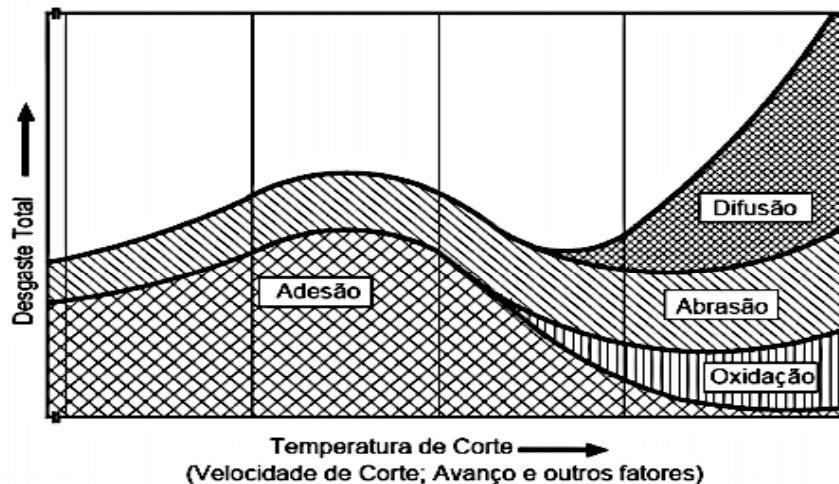


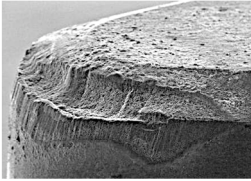

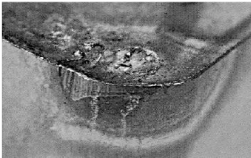

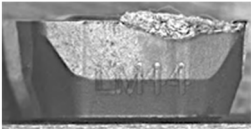


Figura 2.22- Mecanismos de desgaste em função dos parâmetros de corte e da temperatura de corte [37].

O processo de desgaste por abrasão ocorre devido à presença de partículas duras entre as superfícies de deslizamento. A adesão (ou soldadura) verifica-se entre o material a maquinar e a ferramenta de corte quando há afinidade entre os materiais, sendo influenciada por fatores como temperatura, o tempo e a pressão de contacto. A difusão consiste na transferência de átomos pertencentes à rede cristalina de um material para a rede cristalina de outro material. Quanto maior for a afinidade entre materiais e temperatura de contacto, maior a difusão e, consequentemente, maior será a remoção dos elementos da ferramenta que lhe conferem dureza. Relativamente à oxidação, esta pode ser resumida como a formação de uma camada de óxidos na superfície da ferramenta com consequente perda de poder de corte. Ela é resultado do elevado aquecimento da ferramenta e da composição do meio, sendo que só ocorre se existir oxigénio na região aquecida [3, 37].

2.7.6.2 Tipos de desgaste e falhas

Tendo em conta que a análise de uma ferramenta de corte é extremamente importante para se reconhecer a sua capacidade em realizar a remoção de material, são apresentados na Tabela 2.8 os tipos de desgaste e falhas, apresentando-se também alguns dos motivos que proporcionam a sua origem e o modo como podem ser solucionados. De todos estes tipos, o desgaste de flanco é preferível, uma vez que proporciona vida útil da ferramenta previsível e estável.

Tabela 2.8 - Tipos de desgaste verificados nas ferramentas de corte, a sua causa e solução [4, 37]

Tipo de desgaste	Causa	Solução
<p>Desgaste de flanco</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Elevadas velocidades de corte ○ Ferramenta com baixa resistência ao desgaste ○ Refrigeração insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Redução das velocidades de corte ○ Melhorar a refrigeração ○ Escolha de material para a ferramenta de corte com maior resistência ao desgaste
<p>Desgaste tipo entalhe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Ângulo de ataque muito baixo (negativo) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Escolha de material para a ferramenta de corte com maior resistência ao desgaste ○ Alteração da profundidade de corte
<p>Craterização</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Velocidade de corte e/ou avanço elevados ○ Material tenaz na ferramenta de corte 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Reduzir velocidade de corte e/ou avanço ○ Escolha de ferramenta com maior resistência ao desgaste ○ Utilizar na geometria da ferramenta um quebra-apara.
<p>Deformação plástica</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Elevadas pressões de corte ○ Elevadas temperaturas de corte ○ Refrigeração insuficiente 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Diminuição dos parâmetros de corte ○ Alteração de material da ferramenta (escolher um que agüente temperaturas elevadas) ○ Melhorar a refrigeração
<p>Aresta postiça (B.U.E)</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Temperaturas de corte baixas ○ Solda da apara sobre a ferramenta ○ Ângulo de ataque muito baixo ou negativo 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Aumentar parâmetros de corte (implica aumento da temperatura) ○ Alteração do ângulo de ataque da ferramenta
<p>Lascamento na aresta</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Condições instáveis com vibração da máquina/ferramenta 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Garantir estabilidade no processo de corte ○ Escolha de ferramenta de corte mais tenaz e robusta
<p>Fissuras térmicas</p> 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Variação de temperaturas no processo de corte ○ Refrigeração e cortes intermitentes 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Redução das velocidades de corte ○ Aplicação eficiente de refrigeração

2.7.6.3 Lei de Taylor

Como se viu anteriormente, o tempo de vida de uma ferramenta corresponde ao tempo de corte durante o qual a ferramenta de corte é capaz de dar a forma pretendida ao objeto a maquinar. De entre vários critérios utilizados para a determinação da vida de uma ferramenta destacam-se dois: o primeiro, mais usual e mais prático, baseia-se na observação de desgaste da

ferramenta, que quando se considera elevado, deve proceder-se à substituição/reparação; o segundo critério, menos usual, pode ser definido como o tempo de vida necessário para que a ferramenta sofra fratura de uma ou mais arestas de corte. A determinação da vida da ferramenta é efetuada recorrendo a ensaios de maquinagem controlada [3, 6].

Apesar de o desgaste ser mais acentuado com velocidades de corte mais elevadas, na prática é feito sempre um balanceamento entre o desgaste das ferramentas e as taxas de produção, optando-se sempre pela solução mais económica [5].

O gráfico da Figura 2.23 ilustra a relação entre a velocidade de corte e o tempo de vida de uma ferramenta, também conhecida como Lei de *Taylor*.

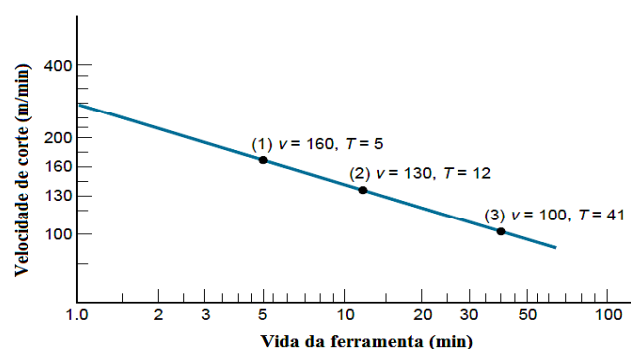


Figura 2.23- Lei de Taylor, relação da vida da ferramenta com a velocidade de corte [6].

Taylor propôs uma equação empírica, que traduz a relação entre a velocidade de corte (V_c) e o tempo de vida da ferramenta (T), em que n e C são constantes dependentes do critério de falha adotado, do material da peça e da ferramenta. A lei de *Taylor* pode ser expressa matematicamente por [6]:

$$V_c \cdot T^n = C \quad (2.7)$$

A equação apresentada é simplificada, uma vez que não contempla fatores que influenciam a vida das ferramentas como a dureza do material a maquinar, avanço e profundidade de corte. Desta forma, são introduzidos novos parâmetros na equação de modo a retificar as simplificações consideradas, obtendo-se assim uma nova equação [3, 5, 6]:

$$V_c \cdot T^n \cdot f_n^m \cdot a_p^p = K \cdot T_{ref}^n \cdot f_{nref}^m \cdot a_{pref}^p \quad (2.8)$$

onde os parâmetros que apresentam no índice *ref* são valores de referência, enquanto que os expoentes m e p são valores determinados experimentalmente e K é uma constante. Note-se ainda que, nesta equação, não está implícita a contribuição da dureza do material, nem da refrigeração utilizada, bastante relevantes no processo.

2.8 Qualidade superficial

As superfícies apresentam irregularidades, que podem ser classificadas em: desvios macrogeométricos (por exemplo desvios de retitude, de planeza ou ondulação) e desvios

microgeométricos (rugosidade). Esta incapacidade de se obter a perfeição na qualidade da superfície maquinada tem a ver com o acumular de defeitos que resultam das características do material a maquinar, estado da ferramenta, parâmetros de corte ou estado da máquina. Assim, o objetivo final é otimizar todos os fatores que causam defeitos, de modo a que o seu peso seja cada vez menor e assim alcançar valores para a rugosidade dentro das especificações técnicas, para que o desempenho da peça maquinada não seja comprometido. Note-se que, associada à diminuição da rugosidade, verifica-se o aumento dos custos de fabrico, devido à necessidade de operações complementares ou substituição de ferramentas de corte [3, 38].

A rugosidade requer especial atenção, uma vez que pode ter influência em funcionalidades como a qualidade do deslizamento, na materialização dos ajustamentos apertados, na qualidade da aderência de revestimentos, na vedação estática e dinâmica [38].

Existem diversos critérios para quantificar as amplitudes das rugosidades, entre os quais se destacam a rugosidade média aritmética (R_a), a rugosidade máxima (R_{max}) e a rugosidade máxima média (R_z). A rugosidade máxima média é definida como o valor médio das alturas máximas, medidas em cinco comprimentos de base consecutivos (comprimento de base – L_c). R_z é usualmente mais sensível a alterações no acabamento superficial do que R_a , sendo por isso bastante usado em produção. Apresenta-se de seguida na Figura 2.24 os valores de R_a que são usualmente verificados para os diferentes processos de maquinagem [39].

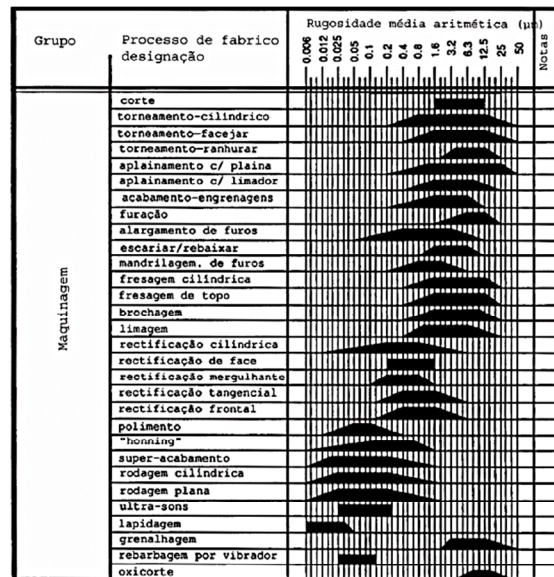


Figura 2.24 - Rugosidade média aritmética (R_a) associada aos processos de maquinagem de acordo com a norma DIN4766 [3].

2.9 Lubrificação e refrigeração do processo de maquinagem

No que diz respeito à lubrificação e refrigeração, vulgarmente utilizada na indústria, verifica-se que a sua correta utilização permite aumentar a vida da ferramenta de corte ou, para o

mesmo tempo de vida, permite a utilização de velocidades de corte mais elevadas, aumentando a produtividade. Além disto, quando utilizada lubrificação e refrigeração, verifica-se uma evacuação mais eficiente da apara, garantindo melhores acabamentos ao processo.

Para desempenhar esta função, é usual encontrar-se agentes sólidos de melhoria do corte, nomeadamente lubrificante sólido (pó misturado com massa ou óleo viscoso e aplicado na face de ataque da ferramenta) ou aditivo metalúrgico (elementos adicionados no fabrico do metal que vai ser maquinado). Além destes, verifica-se a existência de fluidos de corte (mais utilizados) que podem ser líquidos ou gasosos [3].

Os fluidos de corte gasosos de maior interesse são o ar e dióxido de carbono (CO_2). Estes apresentam essencialmente uma função de lubrificação. A penetração dos gases é superior, quando comparada com a dos líquidos. Contudo, a sua capacidade de remoção de calor é inferior àquela que é verificada nos fluidos de corte líquidos. Para compensar esta situação, faz-se o aumento da velocidade e pressão do fluido.

Para os fluidos de corte líquidos, verifica-se a existência de: óleos puros, óleos emulsionáveis (emulsões) e óleos sintéticos. Os óleos puros, com maior utilização, são os de origem mineral devido à grande variedade e baixo custo que apresentam. Estes dividem-se em óleos ativos (indicados para a maquinagem a elevadas pressões e condições de corte severas) que apresentam propriedades anti-adesivas e lubrificantes e óleos inativos que apresentam função de fluido de corte e lubrificante dos suportes e mecanismos das máquinas. Emulsões ou óleos emulsionáveis são óleos que se misturam com a água. No que toca à refrigeração, a água apresenta excelentes resultados, contudo oxida as superfícies e possui baixo valor lubrificante. Estas características podem ser contrariadas por adição de agentes antioxidantes e lubrificantes. Os óleos sintéticos correspondem a agentes químicos misturados em água. As grandes vantagens associadas a este produto traduzem-se na sua elevada capacidade de refrigeração e a sua vida útil prolongada. Estes contam como agentes químicos como aminas e nitritos (impedem a corrosão), fosfatos e boratos (baixam a dureza da água), sabões e agentes de molhabilidade (lubrificação e diminuição da tensão superficial), glicóis (agentes aglomerantes) e germicidas (controlo da proliferação de bactérias) [3, 6].

A utilização do fluido de corte com o efeito de refrigeração permite a redução da temperatura, facilita o manuseamento da peça acabada e garante uma redução das distorções na peça, devido a gradientes de temperatura gerados pelo processo. Quando utilizado como lubrificante, permite uma redução da fricção nas faces de ataque e saída da ferramenta, prevenção da corrosão, redução das forças e consumo de energia (devido à redução do atrito) e a melhoria do acabamento superficial do componente maquinado devido a uma apara mais regular e a uma redução da formação da apara aderente [6].

No gráfico da Figura 2.25 é apresentada a influência dos diferentes fluidos corte nas velocidades de corte que se conseguem obter.

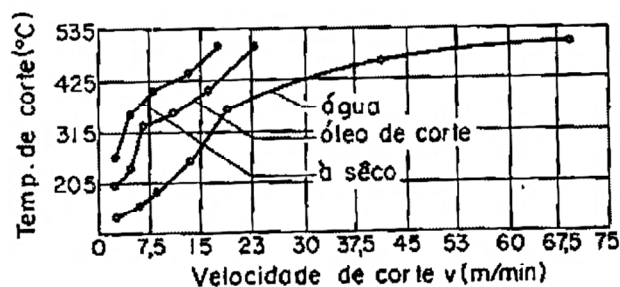


Figura 2.25 - Análise à influência do fluido de corte no calor gerado no processo de maquinagem [9].

Note-se que o modo como é aplicado o fluido de corte tem influência nas propriedades que se pretendem obter. Assim, verifica-se que os fluidos de corte podem ser projetados para a superfície maquinada de uma de duas formas distintas ou combinadas: projeção externa ou projeção interna, Figura 2.26 a) e b), respetivamente. Na projeção interna são utilizados canais de refrigeração existentes no interior da ferramenta, enquanto que na projeção externa são utilizados canais ajustáveis que permitem orientar a projeção de fluido [4].

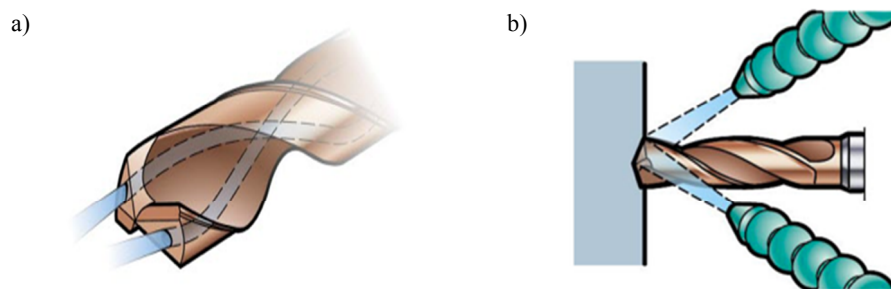


Figura 2.26 - Representação da lubrificação interna a) e externa b) das ferramentas de corte [4].

Do ponto de vista ambiental e dos custos de produção, a maquinagem sem fluidos de corte é a melhor opção. Contudo, deve fazer-se um cálculo de modo a optar-se pela melhor solução, uma vez que maquinar sem fluidos de corte aumenta o desgaste da ferramenta e piora a qualidade superficial da peça maquinada. Assim, se a refrigeração e lubrificação for necessária, deve ser otimizada para maximizar o potencial. Para tal, têm vindo a surgir técnicas como a empregabilidade de fluidos de corte biodegradáveis, a utilização de técnicas que garante a quantidade mínima de lubrificante a usar ou utilizar, preferencialmente, fluidos de corte gasosos.

Daqui resultou o princípio de quantidade mínima de lubrificação (*MQL – Minimal Quantity Lubrification*), que consiste na aplicação de um filme altamente pressurizado na zona de corte, conforme é ilustrado pela Figura 2.27, constituído por gotículas de óleo, que são dispersas num fluxo de ar. Esta técnica tem como inconveniente a projeção das aparas na zona de trabalho, ao invés de serem arrastadas de forma lenta e controlada para fora desta zona [3, 6, 40].



Figura 2.27 - Representação do processo de MQL [40].

3 Ligas de Cu-Zn

3.1 Caracterização das ligas de Cu-Zn

A maquinabilidade depende fortemente do material a maquinar. Assim, nesta secção, apresenta-se a informação sobre as ligas de cobre e zinco, com maior destaque para o latão e, em secções posteriores, será apresentada informação sobre a maquinabilidade associada a estas ligas.

Dentro da diversa gama de ligas de cobre, as ligas de cobre e zinco (Cu-Zn) ganham especial notoriedade devido às suas características, que lhe conferem uma vasta gama de aplicações. A adição de zinco ao cobre, tende a aumentar a resistência mecânica, dureza e ductilidade da liga, além de diminuir o seu ponto de fusão, a densidade, resistência à corrosão e o preço. São assim alcançadas propriedades como a boa resistência à corrosão e ao desgaste, boa condutividade elétrica e térmica e excelentes propriedades anti-bacterianas sendo usual utilizarem-se este tipo de materiais em várias indústrias, como a elétrica e eletrônica, automóvel e sanitária [41, 42, 43, 44].

No que diz respeito à composição química, a liga Cu-Zn é considerada bifásica, uma vez que apresenta uma microestrutura composta por duas fases: a fase α e a fase β (Figura 3.1 a)). De acordo com o diagrama de equilíbrio do sistema binário Cu-Zn, as ligas com percentagens de zinco até aproximadamente 30% solidificam numa só fase, formando uma solução sólida, fase α . Esta é muito rica em cobre, e como tal, apresenta a mesma estrutura cristalográfica que o cobre puro, ou seja, estrutura cúbica de faces centradas (CFC). A fase α (fase macia) é caracterizada por ser de elevada ductilidade e resistência. Esta fase contribui de forma negativa no processo de maquinagem deste tipo de ligas, uma vez que promove a formação de aparas longas e helicoidais [41, 45].

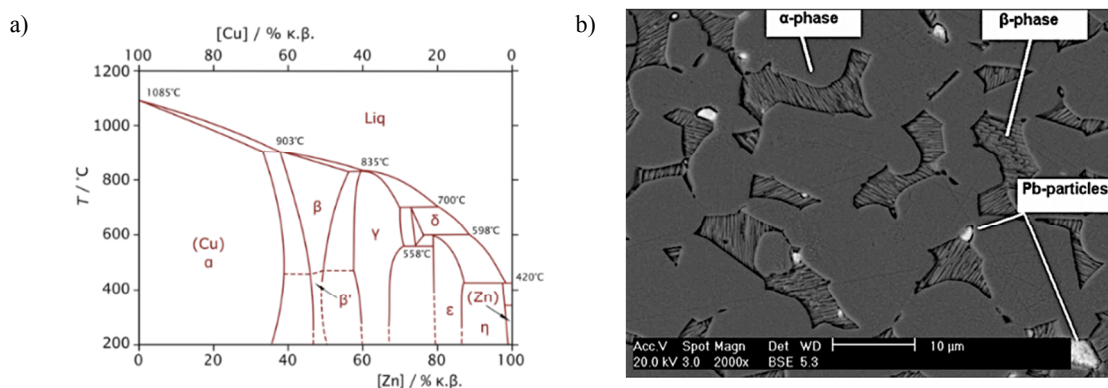


Figura 3.1 - a) Diagrama de fases do Cu-Zn; b) Microestrutura do latão com Pb, fases α e β [46, 47].

Quando o teor de zinco atinge percentagens entre os 38 e 50%, a microestrutura dos latões mostra a presença de um segundo microconstituente denominado fase β (fase dura), além da fase

α já existente. Esta nova fase β tem uma estrutura cristalina CCC (cúbica de corpo centradas), que é mais dura e resistente que a fase α . Apesar de ser menos dúctil, a sua ductilidade melhora com o aumento de temperaturas. Esta fase tem uma influência positiva na maquinabilidade promovendo a fragmentação da apara [41, 45].

A partir de 50% de zinco, forma-se um constituinte não metálico, denominado fase γ , duro e frágil, o qual impede a aplicação industrial destas ligas, não tendo uso prático [41].

O latão é uma variante desta liga binária de cobre e zinco, sendo que em termos de composição apresenta o cobre, elemento principal, usualmente numa percentagem não inferior a 55% da composição química da liga, enquanto que o zinco apresenta uma percentagem entre 5 e 45%. Uma vez que estes elementos aparecem em maior quantidade, são responsáveis pela definição da estrutura do latão: monofásica ou bifásica. Além destes dois elementos podem ainda ser adicionados elementos de liga minoritários tais como chumbo, silício, alumínio, ferro, manganês, estanho, níquel ou o arsénio no sentido de afinar ou melhorar determinadas propriedades ou características. Apresentam-se de seguida as principais características oferecidas pelos elementos de liga [48]:

- Alumínio (Al)

Este elemento, quando adicionado ao latão, promove o melhoramento da sua fluidez e reduz as perdas de zinco por volatilização. Além disto, garante maior resistência à corrosão do latão. O alumínio é ainda um elemento bastante betagénico, ou seja, é um elemento estabilizador da fase β . Como tal, aumenta fortemente a resistência mecânica dos latões, tornando-os mais frágeis.

- Chumbo (Pb)

O chumbo é um elemento bastante útil e benéfico nos processos de fundição e de maquinagem. Na fundição evita o aparecimento de micro-rechupes, enquanto que na maquinagem funciona como lubrificante, reduzindo esforços de corte. Funciona como um elemento betagénico. No entanto, teores elevados em chumbo baixam a resistência à tração dos latões, o que pode provocar o aparecimento de fissuras a quente durante a solidificação das peças fundidas. Na Figura 3.1 b) é ilustrada a presença de chumbo na microestrutura do latão.

- Estanho (Sn)

Este elemento melhora a resistência à corrosão dos latões e, em particular, a resistência à dezincificação. As propriedades mecânicas dos latões também são melhoradas com a presença de estanho. Contudo, não deverão ser adicionados teores superiores a 0.3% de modo a evitar-se fissuração a quente durante o seu arrefecimento.

- Ferro (Fe)

O ferro atua como refinador de grão, o que se traduz numa melhoria da resistência mecânica a quente e consequente redução do aparecimento de fissuras, no arrefecimento de peças

de geometria complexa. O ferro melhora ligeiramente a vazabilidade dos latões. No entanto, o ferro é um elemento reativo, quando presente em grandes quantidades e na presença de outros elementos (como o silício), existe a possibilidade de formação de “pontos duros”.

- Níquel (Ni)

O níquel é por vezes utilizado na composição dos latões devido à melhoria que traz à liga na resistência à corrosão da mesma. Dado o seu custo elevado, não é utilizado em maiores percentagens. Um outro aspeto negativo deste elemento, prende-se com o facto de reduzir a maquinabilidade da liga.

- Silício (Si)

O silício é um elemento bastante betagéneo, pelo que torna o latão mais duro e resistente. Apesar de ser um promotor de boa vazabilidade, o silício tem uma elevada tendência para, juntamente com o ferro e o manganês, formar pontos duros, sendo que o seu teor não deverá exceder os 0.05 %.

- Fósforo e Arsénio (P e As)

O fósforo, tal como o arsénio, melhora a resistência à dezincificação do latão.

- Antimónio e Bismuto (Sb e Bi)

Estes dois elementos em conjunto não devem exceder 0.01 % sob pena de deteriorarem as propriedades mecânicas dos latões.

- Magnésio (Mg)

É um potente desoxidante do latão e torna a sua coloração mais clara.

3.2 Latão utilizado no processo produtivo Grohe

O material base utilizado para os produtos fabricados pela Grohe é o latão, liga de cobre-zinco. Utilizam-se três ligas com composição distintas. Tal é justificado por fatores como a legislação ou composição química da água dos diferentes países para os quais se exportam os componentes aqui produzidos. O latão é o componente de eleição para este tipo de aplicações, uma vez que reúne um conjunto de características como as boas propriedades térmicas e o baixo custo.

Tendo em conta as questões ambientais e de saúde humana relativamente à utilização do chumbo (que serão exploradas novamente em capítulos posteriores) em artigos como os produtos sanitários, a Grohe desenvolveu uma liga com teor de chumbo residual, de forma a estar de acordo com a legislação de cada um dos países para onde exporta os seus produtos. Desta forma, atualmente a Grohe utiliza três ligas de latão diferentes. A grande maioria dos produtos fabricados

utiliza a liga Grohe Light, cerca de 60 a 70% da quota, tendo a liga Grohe DZR cerca de 20% e, o restante é atribuído à liga Grohe 0.

A Tabela 3.1 é referente a algumas propriedades mecânicas, já conhecidas das ligas, fornecidas pela empresa.

Tabela 3.1 - Propriedades mecânicas das ligas Grohe fornecidas pela empresa e revistas, segundo a norma DIN EN 1982

Liga	Dureza	σ_{ced}	σ_{max}	ϵ_r
	HB	MPa	MPa	%
Grohe 0	105	170	450	25
Grohe Light	70	120	280	10
Grohe DZR	70	120	280	10

Para além da liga Grohe Light, usada como referência, existe a liga Grohe DZR, própria para águas mais corrosivas, onde o fenómeno de dezincificação é mais notório e ainda a liga Grohe 0, com menor percentagem de chumbo, devido a regulamentações específicas nalguns países.

A composição das ligas é preparada de forma cuidadosa de modo a que se mantenha aproximadamente constante a sua composição química. Contudo, esta pode sofrer algumas flutuações. O principal motivo associado às flutuações tem a ver com a sucata que é reutilizada. Assim, no processo de fusão podem ser usados os seguintes elementos: lingote, peças sucata, aparas secas, gitos e outras formas possíveis de fazer a recuperação do latão. Em função da liga é feita uma proporção da quantidade em que cada um destes materiais é utilizado. Verifica-se então que, por este motivo, é possível que ligas que correspondam ao mesmo material, mas que resultem de vazamentos diferentes, apresentem composição algo distinta.

A análise ao estudo de cada uma das ligas, utilizadas no processo produtivo, vai ser feita de forma mais pormenorizada aquando da análise e desenvolvimento do trabalho iniciado no ano passado no que se refere à caracterização das ligas DZR, Zero e Light utilizadas no processo produtivo da Grohe.

3.3 Maquinabilidade do Latão

Diversos estudos têm vindo a ser feitos no que diz respeito à maquinabilidade do cobre e suas ligas. Estas são vulgarmente classificadas segundo três grupos, sendo que cada um dos grupos contém materiais com maquinabilidade idêntica. A maquinabilidade de cada grupo foi definida tendo em conta as forças de corte envolvidas no processo, o tipo de aparas formada, o desgaste verificado na ferramenta e a qualidade superficial, geralmente avaliada pela rugosidade. Fazendo a análise a estes parâmetros, é possível estabelecer um índice de maquinabilidade que não é mais do que uma escala de comparação entre a maquinabilidade dos materiais [49].

Assim, pode dividir-se o cobre e as suas ligas como sendo altamente maquináveis (como os latões CuZn40Pb3 e CuZn36Pb3, que apresentam índices de maquinabilidade de 100%), moderadamente maquináveis e ligas difíceis de maquinar, sendo que os latões são enquadrados no grupo intermédio de maquinabilidade [45, 49, 50].

No sentido de melhorar as características mecânicas das ligas, usualmente, são adicionados elementos de liga na fusão. Contudo, alguns elementos de liga são prejudiciais no processo de maquinagem, contribuindo fortemente para o aumento significativo das forças de corte. Daqui resulta um conjunto de consequências como o desgaste prematuro da ferramenta, formação de um tipo de apara indesejável, assim como diminuição da qualidade do acabamento superficial. Para evitar este tipo de situações é indesejável a utilização de elementos como o ferro, titânio e estanho [50].

Por outro lado, é desejável a utilização de elementos como chumbo, enxofre, telúrio, zinco, selênio, silício ou bismuto, uma vez que estes elementos contribuem de forma bastante positiva para uma boa maquinabilidade da liga [45, 50, 51].

De todos os elementos que contribuem positivamente para a melhoria da maquinabilidade, o chumbo é aquele que apresenta uma influência mais significativa. De acordo com investigações feitas, constatou-se que a percentagens de chumbo ótima encontra-se entre os 1 e 3%, contudo este valor depende da fração das fases α e β presentes na microestrutura [45].

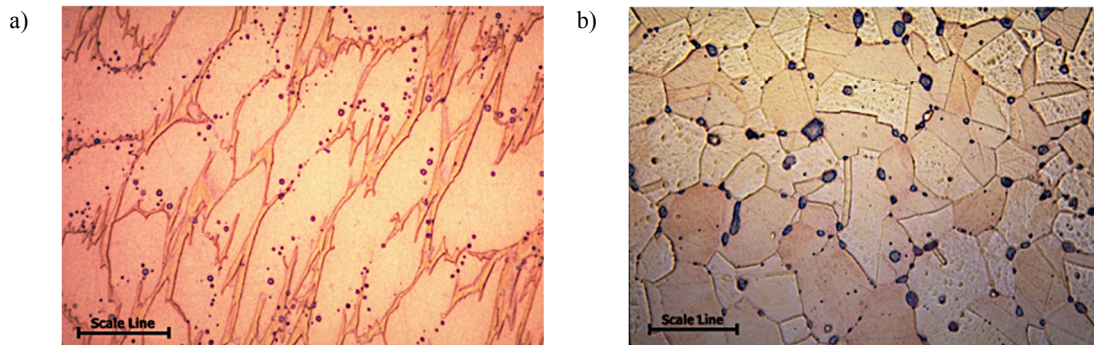


Figura 3.2 - Microestrutura do latão: a) Cu 59.0-64.5, Zn 33.2-40.0, Pb 1.3-2.3, Fe 0.10; b) Cu 60.0-63.0, Zn 33.0-37.0, Pb 2.5-3.7, Fe 0.35 [52].

O chumbo é muito pouco solúvel no latão, dispondo-se sobre a forma de glóbulos na microestrutura, particularmente nas fronteiras entre as fases α e β , tal como se pode verificar na Figura 3.2. A diminuição de diâmetro dos glóbulos de chumbo e aumento da sua densidade faz com que, durante as diversas operações de maquinagem, o chumbo funda, dando origem a uma fina película semi-líquida que atua como lubrificante, baixando o coeficiente de atrito entre a ferramenta e o material, criando descontinuidades que promovem a fragmentação da apara, reduzindo os esforços de corte e o desgaste da ferramenta [45, 47, 48, 50].

Apesar do conhecimento das características que o chumbo garante ao material a maquinar, o uso deste elemento tem vindo a ser restringido na produção de artigos sanitários como torneiras ou canalizações, devido ao efeito nocivo deste elemento para a saúde e ambiente.

Assim, têm vindo a ser desenvolvidas alternativas à utilização do chumbo, como o caso do selénio, bismuto e silício, sendo estes novos materiais alvos de ensaios e testes. Dos estudos feitos, chegou-se à conclusão que durante a maquinagem de latões sem chumbo, as forças de corte e as temperaturas envolvidas no processo acabam por ser de uma ordem de grandeza três a quatro vezes superiores [50, 51].

O silício foi um dos primeiros elementos a ser testado, contudo verifica-se um aumento no desgaste da ferramenta. Tal é devido ao aumento da dureza do latão, por diminuição da fase macia (fase α) e aumento da fase dura (fase β). No que diz respeito às forças de corte, tanto o silício como o alumínio promovem alterações significativas em algumas das componentes das forças de corte, contudo não se introduz uma grande alteração da força resultante. Quando é adicionado estanho ao latão, verifica-se o aparecimento de uma nova fase, responsável pela diminuição de duas componentes dos esforços de corte, de tal modo que a força resultante é também menor [45, 50].

Foi, também, testado o bismuto e comprovou-se que apresenta propriedades semelhantes às do chumbo incluindo o ponto de fusão e a solubilidade no cobre, assim como a densidade. Contudo o uso do bismuto no latão é limitado, porque apresenta um custo dez vezes superior ao do chumbo, o que a nível de produção não se traduz de forma compensatória relativamente aos ganhos de maquinagem que proporciona. Outra desvantagem deste elemento tem a ver com o facto de este se distribuir em grandes quantidades nas fronteiras de grão, diminuindo a ductilidade e aumentando a possibilidade de formação de fissuras [51, 53].

Da análise feita a diversos artigos científicos, pode-se concluir que não existem valores ótimos para os parâmetros de corte para a maquinagem das ligas de latão. Contudo, foram obtidos bons resultados para os seguintes valores de parâmetros de corte: velocidades de corte entre os 20 e os 430 m/min, avanços entre 0.025 e 0.7 mm/rot e profundidades de corte até 2 mm, para ferramentas de metal duro e aços rápidos com revestimentos de TiN. Assim, será legítimo considerar que os valores pertencentes às gamas aqui apresentados são passíveis de ser utilizados no processo de maquinagem das ligas de latão [42, 45, 51].

Uma outra alternativa à melhoria da maquinabilidade das ligas de latão, pode ter a ver com os materiais utilizados nas ferramentas de corte. O PCD como material com grande resistência ao desgaste foi testado como hipótese para a maquinagem de latões sem chumbo, contudo verificou-se a tendência à formação de aparas longas e tubulares. Uma vez que este tipo de aparas é indesejável ao processo, como solução considerou-se a alteração da geometria das ferramentas de corte com introdução de quebra-apara e, desta forma, constatou-se que as condições de maquinabilidade eram amplamente melhoradas. Em alternativa à alteração da geometria das ferramentas em PCD, surge a hipótese de utilização de refrigeração a elevadas pressões, de modo a garantir a quebra da apara e melhorando a estabilidade do processo. Uma outra solução para a melhoria da maquinabilidade deste tipo de latões passa pela utilização de ferramentas revestidas. Testaram-se, assim, ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN,

TiB₂, diamante e DLC. O revestimento de DLC apresenta uma dureza superior do que qualquer um dos outros usando PVD, sendo apenas superado pelo revestimento de diamante dado por CVD [43].

A tendência à adesão do material maquinado à ferramenta é reduzida com os revestimentos de TiAlN e TiB₂, sendo que o revestimento de DLC é onde se verifica uma redução significativa desta tendência. Tal é justificado pelas variações na dureza superficiais das ferramentas, assim como as variações das condutividades térmicas dos materiais envolvidos. Os melhores resultados foram alcançados para o revestimento de diamante por CVD. A dureza e resistência ao desgaste deste elemento é muito grande, não se verificando praticamente nenhum desgaste. A única desvantagem associada a este revestimento tem a ver com o facto de possuir uma aresta de corte muito arredondada, enquanto que para a maquinagem do latão sem chumbo é preferível arestas de corte afiadas de modo a reduzir as forças de corte e a rebarba [43].

4 Estudo da maquinabilidade do latão

Um dos objetivos da dissertação passa por retomar o estudo da maquinabilidade do latão, dando assim continuidade ao trabalho desenvolvido pelo Engenheiro Luís Amaral no ano de 2017 nesta mesma empresa e, paralelamente, preparar e submeter o artigo científico “*Effect of lead on the machinability of brass alloys using PCD cutting tools*”. Assim, ao longo da secção serão apresentados os procedimentos experimentais realizados, a análise aos dados obtidos e as respetivas conclusões desses mesmos dados, além de se apresentarem ensaios complementares de caracterização do material.

4.1 Materiais

As ligas de latão em estudo resultaram do processo de fundição, utilizando-se uma coquilha de cobre com uma cavidade de 58 mm de diâmetro por 180 mm de altura, com uma aplicação prévia de desmoldante à base de cerâmicos. Recorreu-se a vazamento manual (por colher), com o banho de metal líquido a rondar a temperatura de 1000°C. Daqui resultaram seis provetes: dois provetes de cada uma das ligas em análise, doravante designados por Z1, Z2, L1, L2, R1 e R2. Sendo que estes provetes correspondem à liga Grohe Zero, liga Grohe Light e liga Grohe DZR, respetivamente.

De modo a fazer uma correta caracterização do material, fez-se uma análise à microestrutura e análise química, verificação da dureza das amostras e ensaios de compressão e tração. Feita a análise química (com recurso a um espectrómetro de massa) e a análise microestrutural (com recurso a um microscópico ótico *Olympus PMG3*) obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.1.

Verifica-se para a mesma liga resultado de diferentes vazamentos, diferentes variações ao nível da composição. Tal é justificado pela preparação da liga aquando do processo de fusão, tal como foi apresentado na Secção 3.2.

De acordo com a *Copper Development Association*, as ligas em teste apresentam composição semelhante às ligas CuZn39Pb0.5, CuZn35Pb2 e CuZn35Pb1, para as ligas Z, R e L, respetivamente [52].

Destes resultados verifica-se que a liga L e R apresentam chumbo na sua composição, cerca de 0.9% e 1.45% respetivamente, enquanto que para a liga Z este valor é residual (com teor de Pb em Z1 de 0.0513% e em Z2 de 0.159%). Elementos como o Al, Sn e Fe também ganham notoriedade, já que, ao contrário dos restantes elementos apresentado na tabela, a sua percentagem não pode ser considerada residual. O Fe aparece em percentagem superior àquela que é verificada para as ligas R e L, enquanto que para o Al sucede o inverso, já que este elemento

aparece em percentagem superior para as ligas R e L comparativamente às amostras da liga Z. Já o Sn é praticamente igual, em termos de percentagem para qualquer uma das ligas.

Tabela 4.1 - Composição química em percentagem de massa de cada uma das amostras

Elemento	R1	R2	L1	L2	Z1	Z2
Cu	62.67	62.63	59.22	59.07	63.25	63.89
Zn	34.89	35.02	38.97	39.10	36.00	35.12
Pb	1.45	1.46	0.894	0.909	0.0513	0.159
Al	0.506	0.503	0.594	0.590	0.444	0.438
Sn	0.0962	0.0965	0.104	0.104	0.102	0.0088
Fe	0.116	0.114	0.0948	0.0953	0.203	0.318
P	0.0072	0.0057	0.0025	0.0037	0.0036	0.0025
Mn	0.0027	0.0028	0.0016	0.0016	<0.0003	<0.0003
Ni	0.0606	0.0605	0.0865	0.0855	<0.0005	0.0012
Si	<0.0006	<0.0006	0.0023	0.0021	<0.0006	<0.0006
Mg	0.00019	0.00019	0.00025	0.00026	0.00027	0.00029
Cr	0.0019	0.0019	0.0022	0.0022	0.00027	0.00041
As	0.0875	0.0872	0.0140	0.0150	0.0203	0.0471
Sb	0.0033	0.0051	0.0046	0.0046	<0.0030	0.0091
Cd	0.0010	0.0010	0.0011	0.0011	0.00075	0.00075
Bi	0.0023	0.0023	0.0027	0.0027	0.00075	0.00068
Co	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
S	0.0029	0.0030	0.0025	0.0030	0.0029	0.0026
Be	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001	<0.0001
B	0.00056	0.00057	0.00071	0.00069	0.00065	0.00079
Se	0.0038	0.0044	0.0044	0.0045	0.0044	0.0036

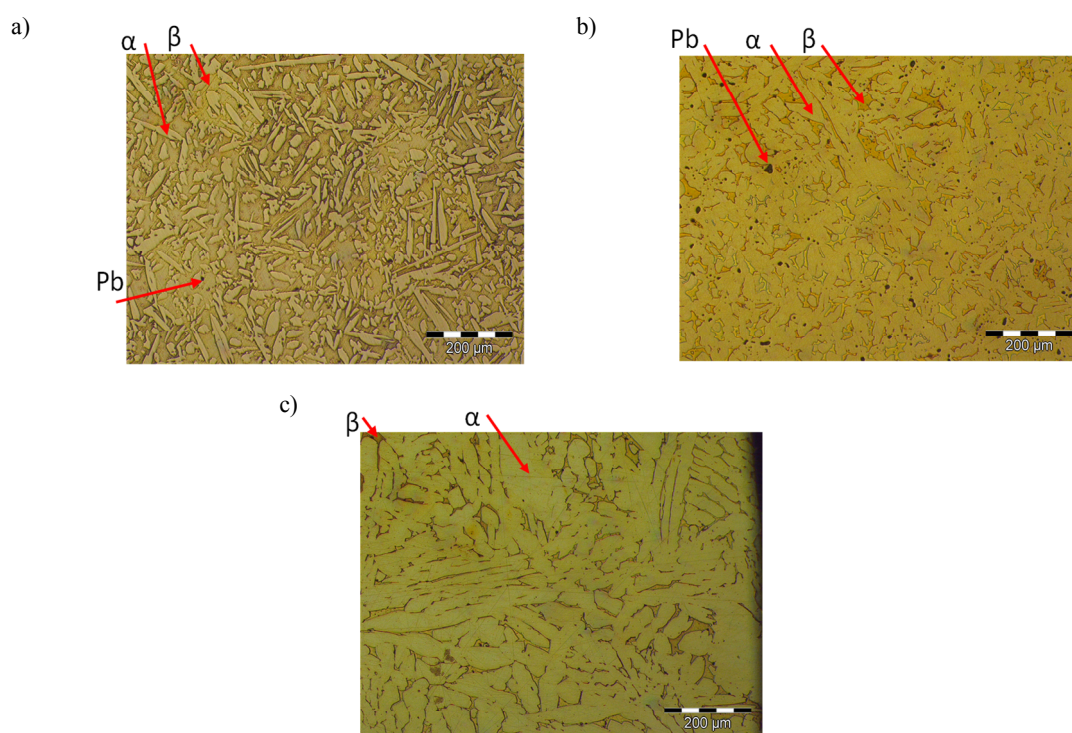


Figura 4.1 -Microestrutura dos latões resultantes da fundição: a) Liga L; b) Liga R; c) Liga Z.

Das microestruturas apresentadas na Figura 4.1, verifica-se que a Liga L corresponde a um latão bifásico (fase α + fase β). A maioria dos pontos negros nas juntas de grão são glóbulos de chumbo (esferóides), formados aquando da solidificação do material. Outros pontos que estejam nas juntas de grão e que não sejam arredondados assumem-se ser inclusões, resultantes do processo de vazamento. Este facto verifica-se também para a liga R. Contudo, apesar da composição química da liga R ser similar à da liga L, origina algumas diferenças microestruturais. A liga R é também um latão bifásico, mas apresenta dendrites de fase α juntamente com fase β , mas cujo tamanho dos grãos varia em relação à liga L.

A microestrutura da liga Z é bastante diferente das restantes ligas. Esta liga apresenta uma composição intermédia entre latões monofásicos (α) e latões bifásicos (α e β). Uma grande presença da fase α é denotada através da quantidade e tamanho das dendrites, para além da reduzida quantidade de chumbo, evidenciada com o raro aparecimento de esferóides junto das fronteiras de grão.

Dos ensaios de dureza verificou-se que a dureza da liga Z é, como esperado, a maior das três ligas ensaiadas, cerca de 120 HV, enquanto que a liga L apresenta uma dureza média de 115 HV e a liga R de 95.9 HV, tal como é apresentado na Tabela 4.2. Foi também feito um teste complementar com o intuito de analisar a possibilidade de a dureza variar com a distância ao centro, sendo esta hipótese rejeitada.

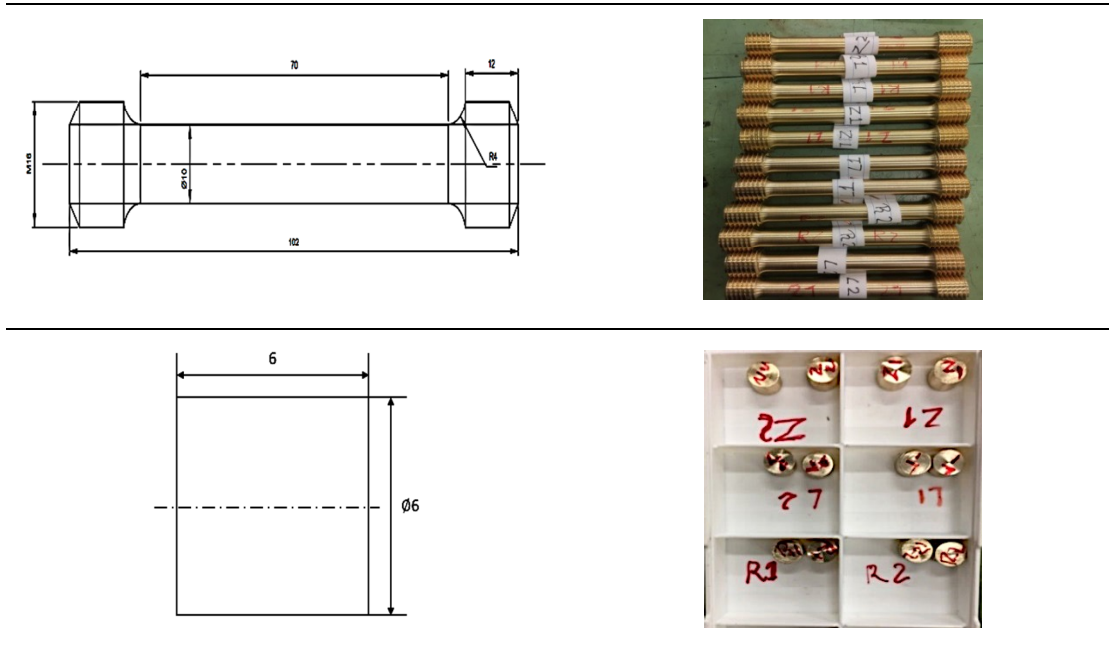
Tabela 4.2 – Dureza HV das amostras

Amostra	Valores individuais			Média	Média da liga
R1	100.3	98	100.3	99.5	95.9
R2	93.6	93.6	89.6	92.3	
L1	115.9	118.9	121.9	118.9	117.9
L2	115.9	115.9	118.9	116.9	
Z1	121.9	102.7	110.3	111.6	120.3
Z2	128.4	131.9	126.4	128.9	

4.1.1 Ensaios de caracterização das propriedades mecânicas do material

Com vista a dar continuidade ao estudo da maquinabilidade do latão, é de real valor fazer a completa caracterização das ligas em estudo. Desta forma, nesta secção serão apresentados os procedimentos utilizados e os resultados obtidos para os ensaios de tração e de compressão para as seis amostras (duas de cada liga) utilizadas, seguindo os procedimentos de norma EN 10002 no caso do ensaio de tração. A preparação dos provetes decorreu nas oficinas do DEMec da FEUP com recurso ao torneamento, sendo que os ensaios foram realizados no LET (Laboratório de Ensaios Tecnológicos) da mesma instituição. A Tabela 4.3 ilustra a geometria dos provetes utilizados para os ensaios de tração e de compressão.

Tabela 4.3 - Provetes para ensaios de tração e compressão



Fez-se a preparação dos provetes para os ensaios de tração com operações de pintura e traçagem de linhas de referência para garantir uma correta análise, Figura 4.2.

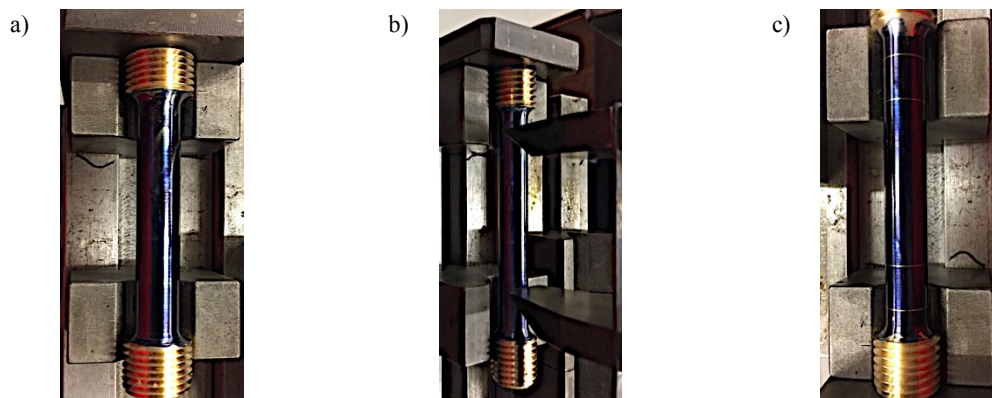


Figura 4.2 - Marcação dos provetes de tração com linhas de referência: a) provete pintado; b) marcação do provete; c) provete marcado.

Usualmente, os testes de compressão são propostos para avaliar as curvas de tensão-extensão que normalmente são necessárias para modelar os processos de corte. Em alternativa, as propriedades de tração podem ser importantes para entender a fratura da apara devido a tensões geradas que podem aparecer aquando da sua flexão. Um transdutor de deslocamento com 50 mm de comprimento (tal como é apresentado na Figura 4.3) foi usado para calcular as extensões.

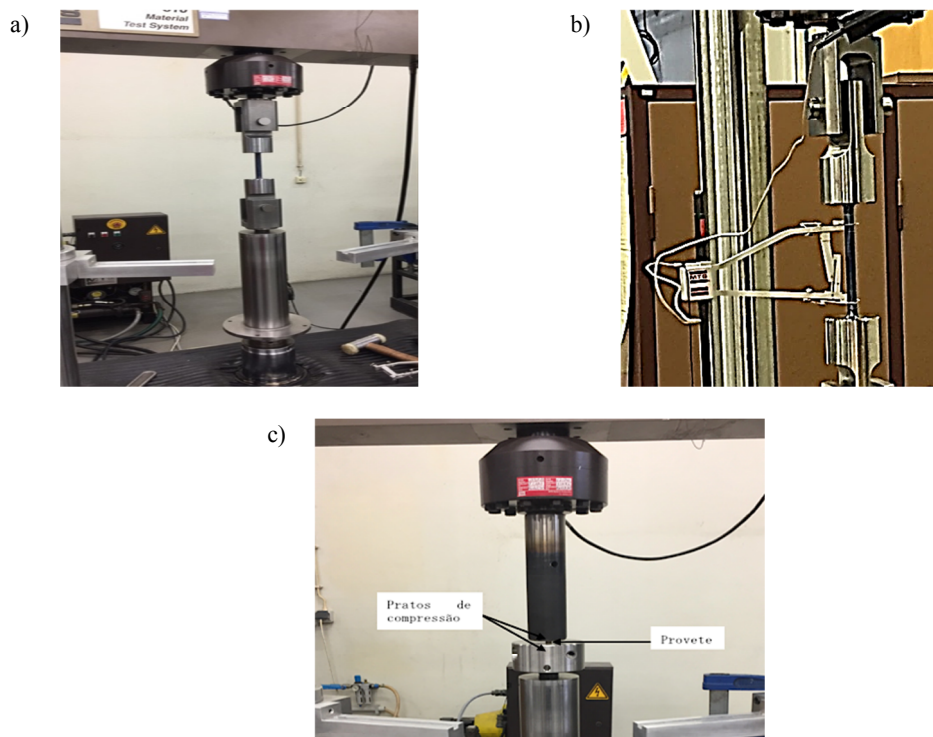


Figura 4.3- a) Alocação do provete na máquina de ensaios de tração; b) Colocação do transdutor de deslocamento; c) Ensaio de compressão.

Para os ensaios de compressão, utilizaram-se provetes cilíndricos de 6 milímetros de diâmetro e 6 milímetros de altura. Para os ensaios de tração, usou-se uma velocidade de tração constante e de valor igual a 3 mm/min, enquanto que nos ensaios de compressão considerou-se uma taxa de extensão verdadeira constante de 0.133. Para ambos os ensaios realizados, foram obtidas as curvas resultantes dos ensaios de tração e de compressão com recurso à utilização de tensões e de extensões verdadeiras. O gráfico da Figura 4.4 ilustra a curva de tensão-extensão para os comportamentos de tração.

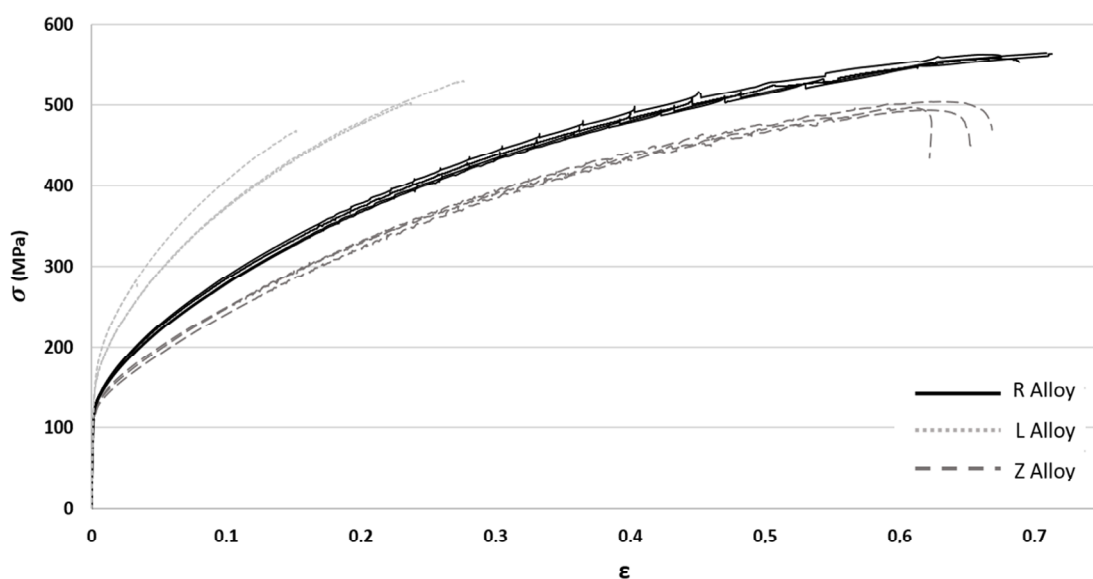


Figura 4.4 – Resultados dos ensaios de tração das ligas R, L e Z.

Do gráfico acima apresentado verifica-se que, dentro da mesma liga, para todos os provetes ensaiados as ligas R e Z apresentam comportamentos muito semelhantes ao contrário do que acontece para a liga L, onde é verificado alguma dispersão. As duas curvas da liga L, apresentadas na zona superior esquerda do gráfico, traduzem o comportamento dos provetes da liga L1; os dados resultantes da análise mostram que esta liga tem grande sensibilidade ao entalhe, uma vez que um dos provetes rompeu, devido a uma impureza resultante do processo de vazamento, tal como é apresentado na Figura 4.5 a), enquanto que o segundo provete ensaiado rompeu na linha de marcação da referência, Figura 4.5 b). A liga R é aquela que apresenta maior tenacidade.



Figura 4.5 - a) Rotura do provete na zona de marcação da linha de referência; b) Defeito no interior do provete.

Os resultados das propriedades mecânicas dos materiais estão sistematizados na Tabela 4.4. Estas propriedades são semelhantes às propriedades registadas para as ligas de composição química semelhante.

Tabela 4.4 - Propriedades mecânicas observadas nos ensaios de tração

					Provete						
	R1_1	R1_2	R2_1	R2_2	L1_1	L1_2	L2_1	L2_2	Z1_1	Z1_2	Z2
E (GPa)	75.0	93.5	78.5	106.1	99.2	96.9	100.2	94.7	99.4	103.2	96.8
		88.3				88.3				99.8	
σ_{ced} (MPa)	183.0	182.0	177.0	177.0	254.0	255.0	231.0	232.0	157.0	163.0	164.0
		179.8				179.8				161.3	
σ_{max} (MPa)	562.2	557.5	564.9	564.7	-	-	502.2	529.7	493.2	503.5	496.7
		562.3				562.3				497.8	
ϵ_r	0.65	0.67	0.71	0.71	-	-	0.23	0.27	0.62	0.62	0.61
		0.69				0.25				0.62	

Da análise feita ao gráfico da Figura 4.4 e à Tabela 4.4 verifica-se que os valores máximos de σ_{ced} e σ_{max} verificam-se para a liga L. Verifica-se que na generalidade o valor do módulo de elasticidade está de acordo com o valor de referência do latão (100 GPa), com exceção das ligas R1_2 e R2_2 que apresentam menor rigidez.

Dos restantes ensaios há a realçar o facto da liga R (com maior teor de chumbo) apresentar ductilidade superior às restantes ligas analisadas e ainda o facto de apenas ter sido verificado estrição para os provetes da liga Z, Figura 4.6. Nestes provetes é verificada estrição, associadas a deformações plásticas localizadas. Este efeito poderá estar relacionado com a diminuição do chumbo, contudo não podem ser retiradas conclusões só com base no efeito do chumbo.

Resumidamente, é possível afirmar que a ductilidade diminui com a diminuição do teor de chumbo; a resistência à deformação da liga R é intermediária entre as ligas L e Z; a liga L é a

mais frágil e liga Z a que mostra estrição. A variação do conteúdo de chumbo não pode ser a única explicação para a variação do comportamento de tração, sendo que a variação de outros elementos também deve desempenhar um papel importante, assim como as diferentes microestruturas.



Figura 4.6 - Apresentação dos provetes que sofreram estrição (Z1.1, Z1.2 e Z2).

O gráfico da Figura 4.7 ilustra as curvas de tensão-extensão para comportamentos de compressão.

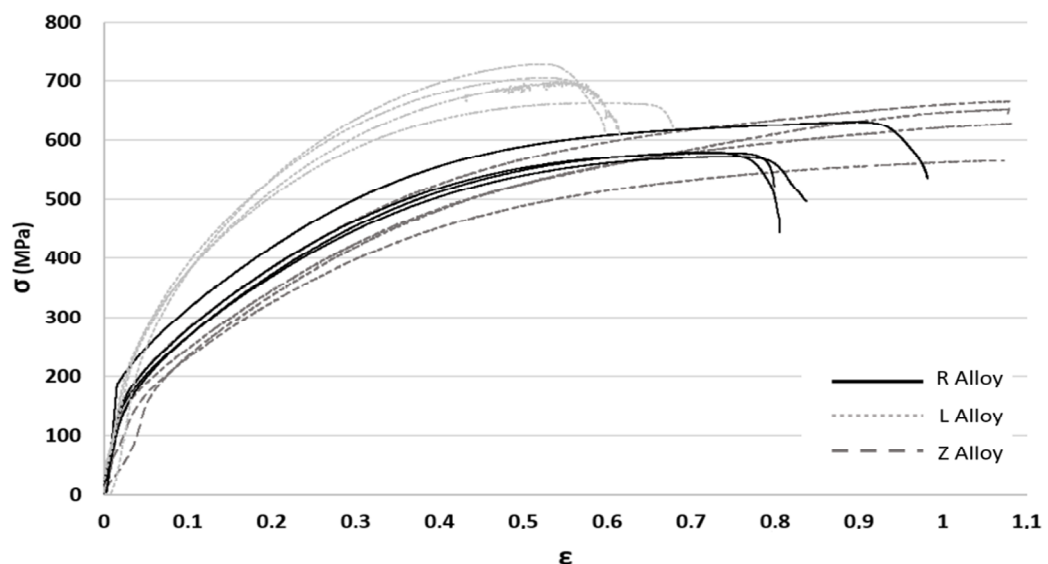


Figura 4.7- Resultados dos ensaios de compressão das ligas R, L e Z.



Figura 4.8 - Configuração final dos provetes de compressão das ligas R e L em a) e da liga Z em b).

Da análise feita às curvas resultantes dos ensaios de compressão constatou-se que todas as ligas apresentam uma dispersão satisfatória. Em todos os casos, os pratos não realizaram o curso pré-estabelecido por rotura do provete conforme é apresentado na Figura 4.8 a). De salientar que os provetes da liga Z apresentaram também um aspeto rendilhado, conforme é ilustrado com

a Figura 4.8 b), a não exibição fendas de fratura claras neste ensaio, mostra consistência com o que esta liga exibiu estrição aquando do ensaio de tração. Os resultados das propriedades mecânicas à compressão dos materiais estão sistematizados na Tabela 4.4.

Tabela 4.5- Propriedades mecânicas observadas nos ensaios de compressão

	Provete											
	R1_1	R1_2	R2_1	R2_2	L1_1	L1_2	L2_1	L2_2	Z1_1	Z1_2	Z2_1	Z2_2
σ_{ced} (MPa)	220.0	240.0	196.0	203.0	388.0	327.0	380.0	380.0	176.0	266.0	232.0	227.0
		215.0				215.0				225.0		
σ_{max} (MPa)	603.7	578.4	572.0	579.8	705.4	727.8	699.6	662.6	652.0	565.0	665.3	628.2
		583.0				583.0				628.0		
ϵ_r	0.85	0.62	0.66	0.62	0.41	0.42	0.42	0.47	1.00	0.86	0.96	0.88
		0.68				0.43				0.93		

No geral, os resultados registados na Tabela 4.5 para os ensaios de compressão foram semelhantes àqueles que se verificaram para os ensaios de tração, com os maiores valores de σ_{ced} e σ_{max} a serem obtidos para a liga L (que apresenta menor ductilidade). Contudo, nestes ensaios é a liga Z que apresenta maior extensão após rotura, assim tem-se que para no caso da compressão é esta a liga que maior ductilidade apresenta. Em ambos os ensaios foi verificado que a liga com menor teor de chumbo é aquela que apresenta uma rotura mais previsível. As ligas L e R exibiram uma queda final de resistência devido à fissuração das amostras.

Da comparação feita entre os resultados obtidos para os ensaios de realizados, verifica-se desfaseamento para os valores de σ_{ced} , σ_{max} e de ϵ_r , sendo que para os ensaios de compressão são registados os maiores valores, na generalidade dos casos.

4.2 Procedimento experimental de maquinagem

Foram realizados ensaios de maquinagem têm como objetivo avaliar a maquinabilidade de cada uma das ligas, pelo Eng. Luís Amaral, de tal forma que nesta dissertação foi possível fazer uma análise aos resultados e retirar as devidas conclusões. Para tal, foram obtidos provetes de acordo com a norma ISO 3685-1993, com o furo de centragem e um rácio comprimento/diâmetro inferior a 10, característicos deste tipo de provetes. Desta forma, estipulou-se a utilização de um diâmetro de 55 mm e um comprimento de 180 mm, conforme é apresentado na Figura 4.9 d).

Os ensaios foram realizados com recurso a uma ferramenta de corte com uma pastilha de metal duro (Figura 4.9 a) e b)) na qual foi inserida uma plaqueta lisa (sem quebra aparta) de PCD. Durante os ensaios agendados, não houve necessidade de fazer a substituição da pastilha de corte, uma vez que não se observou desgaste da mesma. Na Tabela 4.6 apresentam-se as características geométricas da pastilha de corte utilizada. Os ensaios decorreram sem qualquer utilização de fluidos de corte, o que permitiu garantir que todos os ensaios decorressem sempre com as mesmas condições controladas.

Os ensaios de maquinabilidade realizaram-se com recurso a um torno paralelo convencional, caracterizado por uma potência de 5.9 kW e uma frequência de rotação máxima de 2500 rpm. As frequências de rotação são escalonadas e os avanços (f_n) são predefinidos de acordo com a cadeia cinemática do torno. Estes ensaios foram instrumentados com células de carga, de modo a permitir a medição dos esforços de maquinagem (F_a , F_p e F_c). Durante o torneamento, foi utilizada uma célula de carga, composta por um dinamómetro piezoelétrico *KISTLER 9257B*, e um sistema de fixação baseado no sistema *KISTLER 9403* (Figura 4.9 c)).

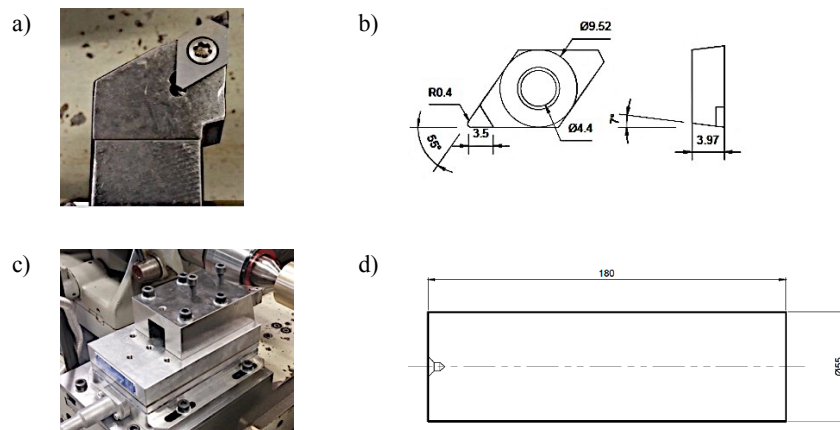


Figura 4.9 - a) Ferramenta de corte utilizada nos ensaios de torneamento; b) Provetes cilíndricos utilizados nos ensaios de torneamento; c) Célula de carga; d) Geometria da pastilha de corte.

A escolha das velocidades de corte, avanços e profundidades de corte a ensaiar foi feita de acordo com os estudos previamente realizados na maquinagem de ligas de latão de semelhante composição. Assim, utilizaram-se valores de velocidade entre 80 e os 430 m/min. A sequência de parâmetros de corte utilizados nos ensaios está esquematizada na Tabela 4.7.

Tabela 4.6 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios de torneamento

n rpm	a _p mm	f _n mm/rot	V _c m/min	n rpm	a _p mm	f _n mm/rot	V _c m/min
2500	0.25	0.05	431.97	1800	0.25	0.05	285.57
		0.14				0.14	
		0.25				0.25	
	0.5	0.05	428.04		0.5	0.05	282.74
		0.14				0.14	
		0.25				0.25	
	1.5	0.05	420.19		1.5	0.05	277.09
		0.14				0.14	
		0.25				0.25	
900	0.25	0.05	130.06	630	0.25	0.05	82.14
		0.14				0.14	
		0.25				0.25	
	0.5	0.05	128.65		0.5	0.05	81.15
		0.14				0.14	
		0.25				0.25	
	1.5	0.05	125.82		1.5	-	79.17
		0.14				0.14	
		0.25				0.25	

Tabela 4.7 - Características da pastilha da ferramenta de corte

Geometria da ferramenta	Valor
Ângulo de posição da aresta de corte	90°
Ângulo de ataque	0°
Ângulo de inclinação da aresta de corte	0°
Ângulo de saída	7°
Ângulo de ponta	55°
Raio de ponta	0.4 mm

Além da análise feita às forças de corte realizadas na primeira fase de testes, os tipos de aparas produzidos e a rugosidade da superfície também foram alvo de avaliação para os diferentes testes de maquinagem. Em cada ensaio, coletaram-se amostras de aparas para a implementação de tabelas comparativas. O acabamento superficial do provete foi analisado com três critérios de rugosidade diferentes (R_a , R_z e R_{max}) para cada uma das condições de ensaio com o auxílio de um rugosímetro portátil, *Hommel Tester T500*.

4.3 Análise de resultados

Tendo em conta o procedimento apresentado anteriormente, realizaram-se os ensaios e obtiveram-se as forças, potências e pressões específicas de corte, além das diferentes rugosidades e tipos de aparas. Desta secção serão apresentados e discutidos os resultados.

4.3.1 Potências, Forças e Pressões Específicas de corte

As forças de corte dependem das propriedades do material da peça, dos parâmetros de corte e das ferramentas envolvidas no processo de corte. Uma combinação desses elementos resulta em diferentes efeitos de atrito entre a ferramenta e a peça de trabalho, bem como diferentes tipos de aparas geradas.

Os esforços de corte obtidos com os testes de maquinagem permitem uma análise mais apropriada e a escolha dos parâmetros de corte com os quais estas ligas de latão deverão ser maquinadas. De acordo com o gráfico da Figura 4.10, verificou-se que para uma profundidade de corte de 1.5 mm, as forças de avanço são aproximadamente quatro vezes menores que as forças de corte e estes valores tendem a diminuir com o aumento do avanço. A mesma situação se verificou para a relação entre as forças de penetramento e as forças de corte, mas para este rácio, as forças de corte são 10 vezes maiores que as forças de penetramento. Observou-se também que, para o mesmo material, a variação da velocidade de corte não representa variações significativas nos índices mencionados. Como as forças de corte apresentam uma contribuição bem mais significativa na força de maquinagem quando comparadas com as forças de avanço e penetração, a análise destas duas forças não foi considerada nesta dissertação.

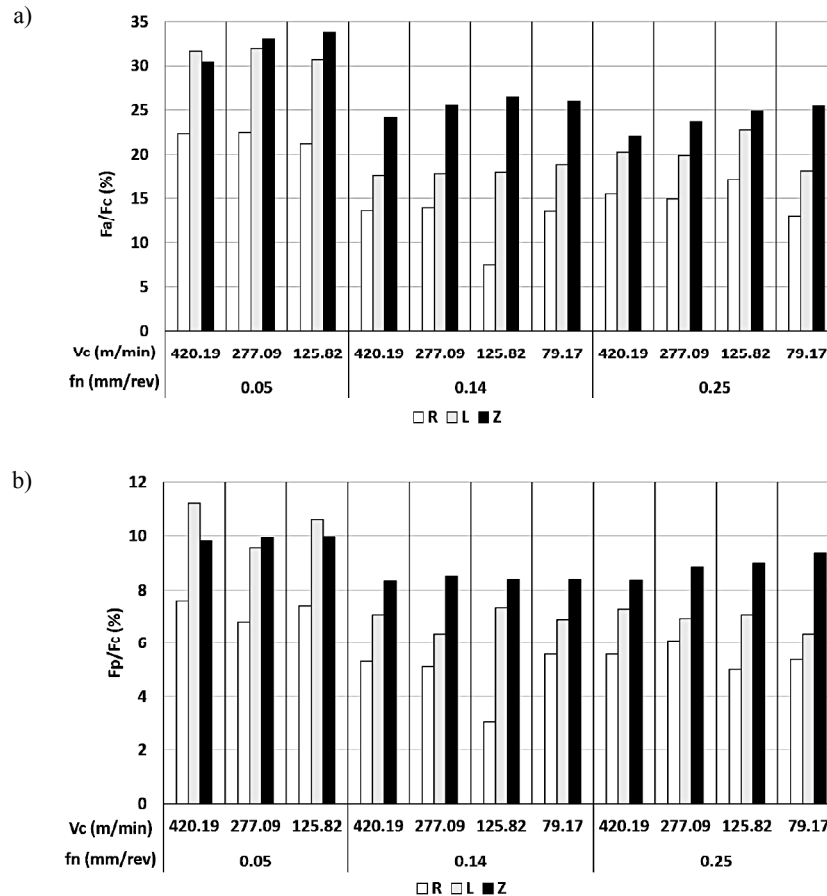


Figura 4.10— a) Rácio entre a força de avanço e força de corte; b) Rácio entre a força de penetramento e a força de corte.

O gráfico da Figura 4.11 representa a evolução da força de corte (F_c) com o avanço e profundidade de corte para as diferentes ligas. A partir da análise dos resultados, verifica-se a influência significativa do avanço e da profundidade de corte na força de corte, uma vez que a seção de apra é definida diretamente por esses dois parâmetros e, desta forma, a força de corte aumenta com o aumento da seção transversal da apra. No que diz respeito à influência da velocidade de corte, verifica-se o seu efeito menos notório na força de corte comparativamente ao efeito causado pela área transversal da apra. Por exemplo, para a menor profundidade de corte, percebe-se que a maior velocidade de corte testada levou às menores forças de corte.

As diferentes ligas têm uma influência muito clara e consistente na força de corte, sendo que esta aumenta com a redução da quantidade de chumbo, atingindo o máximo para o latão sem chumbo (Z), cujo o efeito da profundidade de corte é ainda maior do que para as outras duas ligas. A liga Z produziu forças de corte máximas de 450 N, enquanto as restantes ligas atingem apenas 300 N. De acordo com a revisão da literatura, esperava-se que as ligas com maior teor de Pb tivessem menores forças de corte, como verificado com estes resultados para as ligas R e L (com chumbo) exibindo forças de corte cerca de 1.5 vezes menores do que a liga sem chumbo em teste (Z). Isto pode ser devido à redução do coeficiente de atrito entre a apra e a face de ataque causada pelo efeito lubrificante do chumbo. Estudos feitos mostram que para uma velocidade de corte (V_c) 165 m/min, avanço (f_n) de 0.1 mm/rot e profundidade de corte de 1.5 mm foram obtidos valores

de forças de corte de 280, 170 e 190 N para ligas de composição semelhantes às aqui discutidas (Z, R e L, respectivamente). Verifica-se assim que estes valores suportam os resultados obtidos experimentalmente [45].

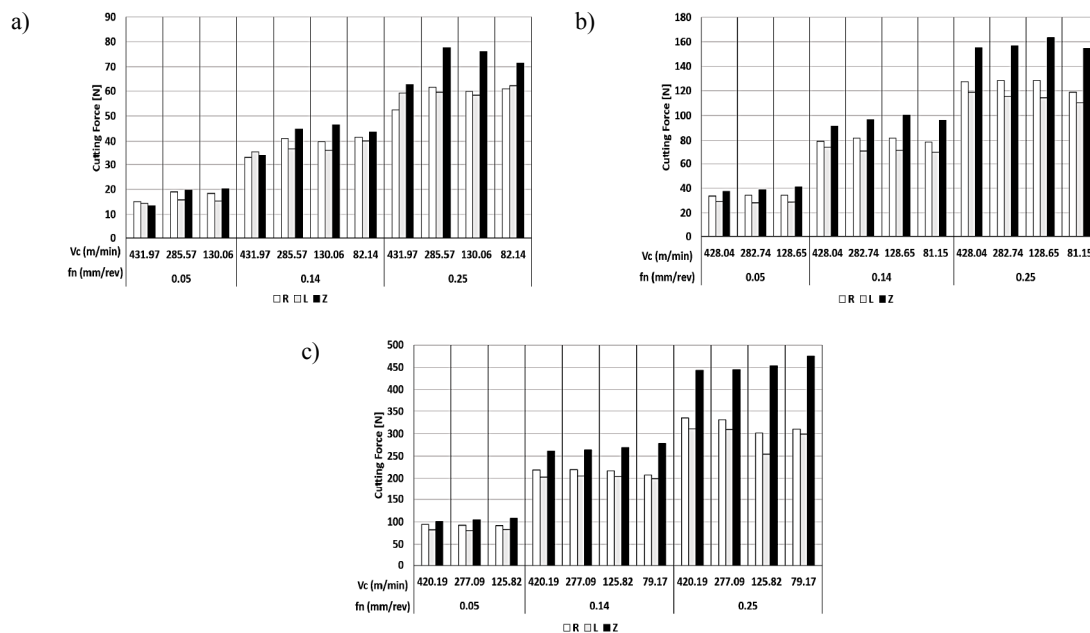
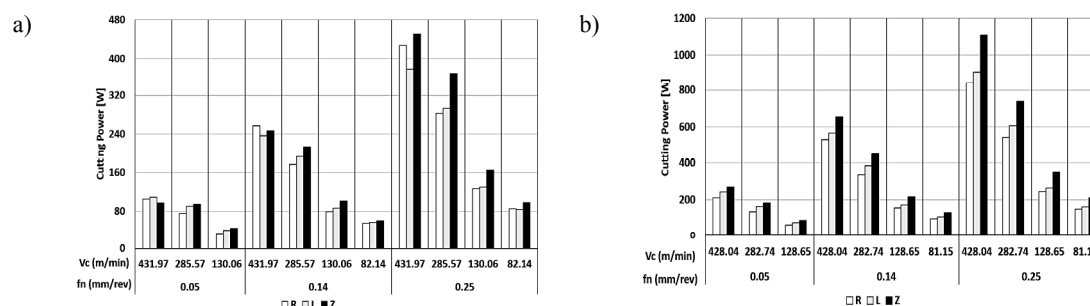


Figura 4.11- Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento nas forças de corte: a) $a_p = 0.25$ mm; b) $a_p = 0.5$ mm; c) $a_p = 1.5$ mm.

A potência de corte (P_c) é um dos parâmetros usados para medir a quantidade de energia necessária por unidade de tempo para remover o material durante o processo de maquinagem. Este parâmetro foi calculado pelo produto da velocidade de corte pela força de corte. Além da velocidade de corte, também a variação de parâmetros como o avanço e o penetramento introduzem variações nos valores registados, conforme ilustrado no gráfico da Figura 4.12. Como esperado, com o aumento da profundidade de corte (a_p) de 0.25 para 0.5 mm, a potência de corte tem um aumento de aproximadamente 100%. Para profundidades de corte de 0.5 e 1.5 mm, a liga Z apresentou potências de corte significativamente maiores que as demais ligas. As ligas L e R exibiram potências de corte mais próximas para essas duas profundidades de corte, mas com resultados consistentemente mais altos para a liga L. Para $a_p = 0.25$ mm há alguns resultados contraditórios com a liga R, exibindo maior consumo de energia que as outras ligas.



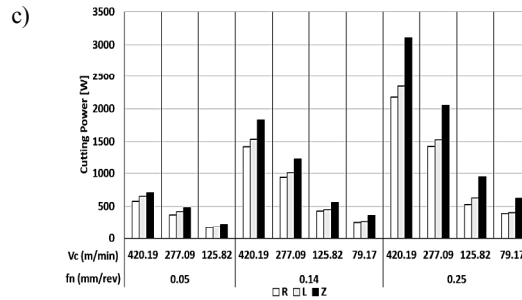
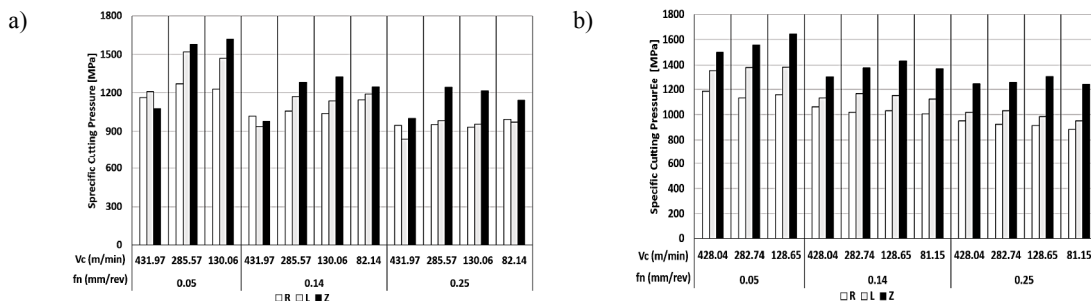


Figura 4.12 - Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento na potência de corte: a) $a_p=0.25$ mm; b) $a_p=0.5$ mm; c) $a_p=1.5$ mm.

A pressão específica de corte (K_s) é normalmente usada em aplicações industriais para estimar potências e forças de corte para um material, bem como os custos de maquinagem associados ao processo e estabelecer o índice de maquinabilidade de um material. O valor de K_s também pode ser obtido pela razão entre a força de corte (F_c) e a área de secção da apana não deformada (S) que, por sua vez, é o produto da profundidade de corte (a_p) pelo avanço (f_n). Embora seja útil a análise da variável área de secção, será mais produtiva a análise da profundidade de corte e do avanço em separado. Verifica-se assim que a maquinabilidade de um material aumenta com a diminuição do valor da pressão específica de corte.

Da análise feita ao gráfico da Figura 4.13 verifica-se que, no geral, a pressão específica de corte aumenta com decréscimo do avanço. Em função da composição química das ligas testadas, verifica-se que as pressões específicas de corte aumentam com a redução do teor de chumbo. Este argumento é sustentado pelo facto da liga Z apresentar os valores mais elevados de pressões específicas de corte. Contudo, verificou-se uma exceção para as ligas Z e L para $a_p=0.25$ mm a velocidades de corte elevadas, onde as pressões específicas de corte são mais baixas. No caso da liga Z, à medida que se dá o aumento da profundidade de corte, há convergência entre os valores de K_s , porém, com o aumento da velocidade de corte, verifica-se a sua diminuição. Para as R e L, não é verificada uma variação significativa do valor de K_s com a variação da velocidade de corte.



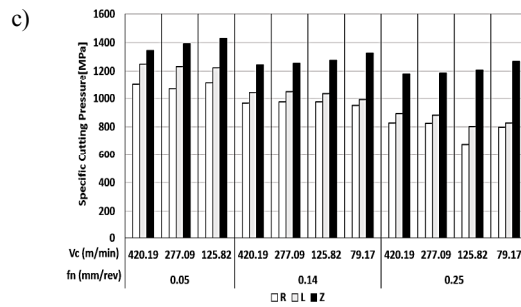


Figura 4.13- Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento na pressão específica de corte: a) $a_p=0.25$ mm; b) $a_p=0.5$ mm; c) $a_p=1.5$ mm.

4.3.2 Rugosidades

O acabamento superficial é também um parâmetro indicativo da maquinabilidade do material. Os valores de rugosidade R_a , R_z e R_{max} foram medidos e os valores médios apresentados nos gráficos das Figuras 4.14, 4.15 e 4.16.

Os valores de R_a foram semelhantes entre as três ligas com a liga L mostrando, na maioria dos casos, os menores valores. Analisando os valores de R_z e R_{max} , verifica-se que as ligas L e R apresentam valores muito semelhantes, enquanto a liga Z apresenta valores R_z e R_{max} muito elevados.

Verifica-se que a velocidade de corte e a profundidade de corte não têm impacto significativo na qualidade da superfície. No entanto, como esperado, o avanço influencia significativamente a rugosidade da superfície, uma vez que se dá redução da rugosidade com a diminuição dos valores do avanço.

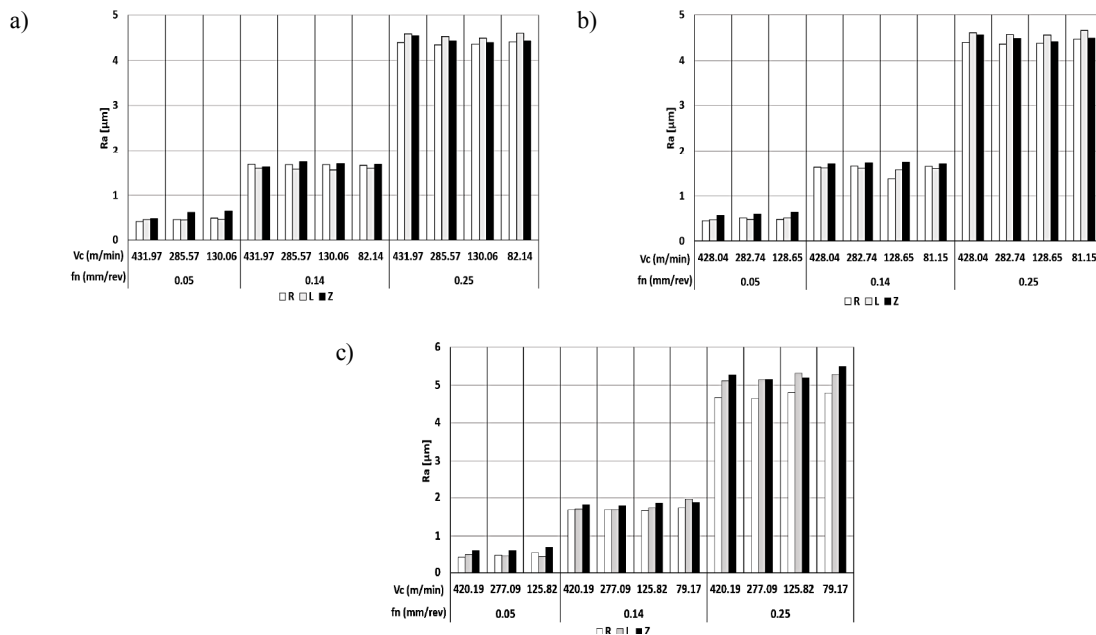


Figura 4.14 - Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento em R_a : a) $a_p=0.25$ mm; b) $a_p=0.5$ mm; c) $a_p=1.5$ mm.

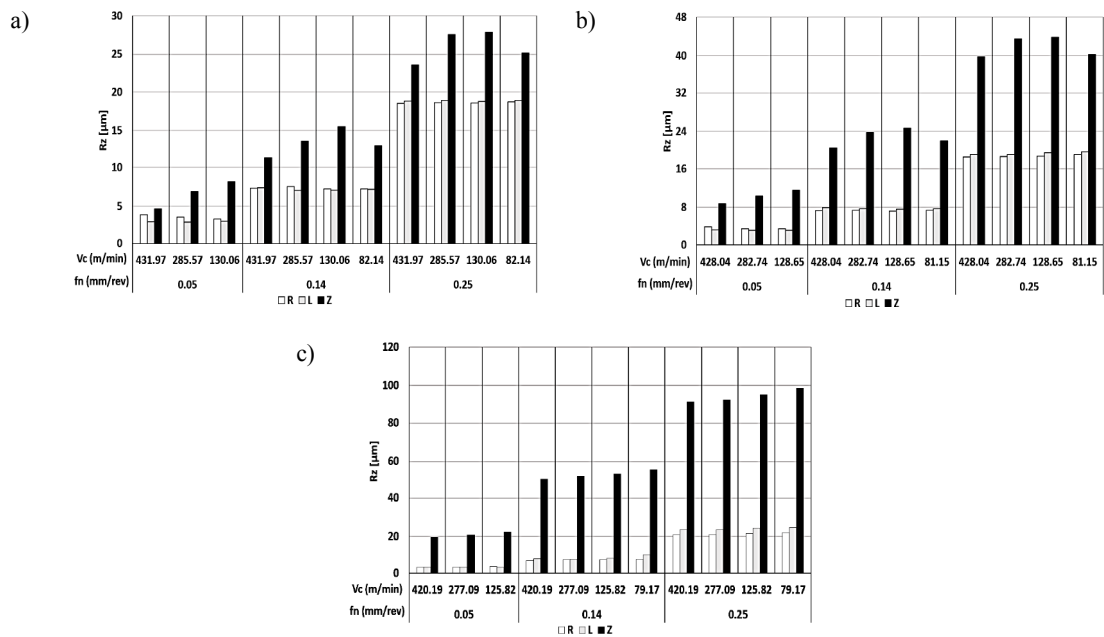


Figura 4.15 – Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento em R_z : a) $a_p=0.25$ mm; b) $a_p=0.5$ mm; c) $a_p=1.5$ mm.

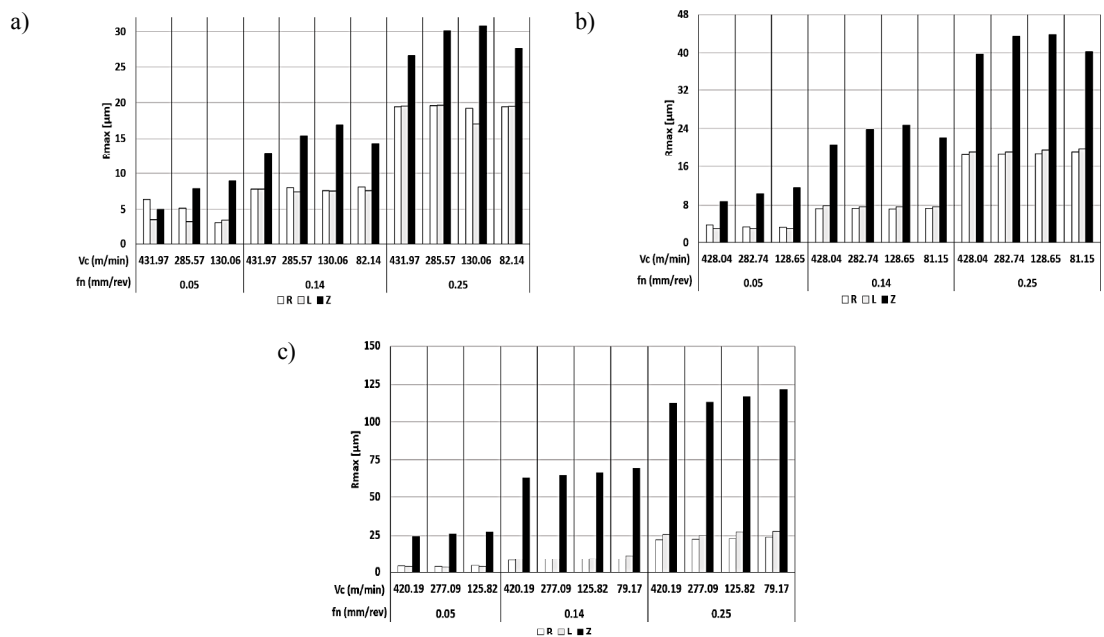


Figura 4.16– Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento em R_{max} : a) $a_p=0.25$ mm; b) $a_p=0.5$ mm; c) $a_p=1.5$ mm.

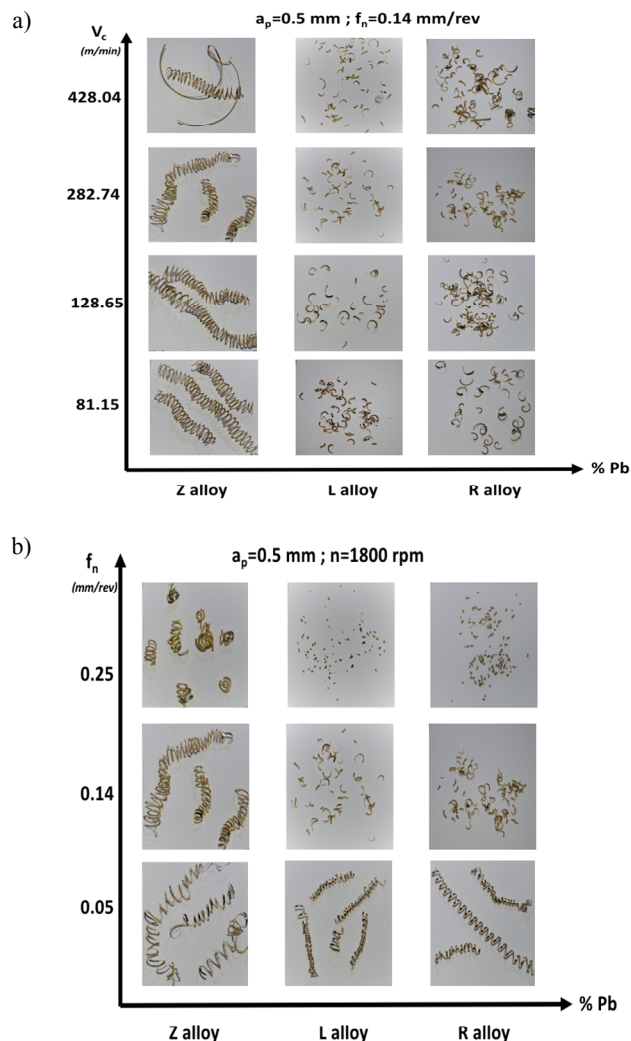
4.3.3 Aparas

A classificação da apara será baseada na sua aceitabilidade. Assim, podem ser consideradas aparas aceitáveis aquelas que não interferem com o processo e sua remoção da zona de maquinagem é fácil, enquanto que as aparas inaceitáveis interrompem a operação normal ou introduzem anomalias no processo de maquinagem.

Da análise às aparas recolhidas e sistematizadas no gráfico da Figura 4.17, é possível observar uma certa periodicidade do tipo de apara para as ligas L e R. Esta repetibilidade é visível

a cada três ensaios (onde é mantida a velocidade de corte e profundidade de corte, variando apenas o avanço). A sequência que se repete é a de uma apara longa e helicoidal (para $f_n=0.05$ mm/rot), seguida de uma apara em arco (para $f_n=0.14$ mm/rot) e um terceiro e último classificação é de uma apara fragmentada e lascada (para $f_n=0.25$ mm/rot), conforme é apresentado no gráfico da Figura 4.17 b). A liga Z é analisada em separado pois o tipo de apara difere bastante das restantes ligas, sendo que esta liga gera sobretudo aparas em fita e helicoidais em gume. Na liga Z não parece existir grande sensibilidade aos parâmetros de corte. Apenas de notar que, para as velocidades de corte mais baixas, verificou-se que a apara é sempre helicoidal em gume.

Verifica-se que as ligas que apresentam maior teor de chumbo (L e R), apresentam um tipo de apara preferível ao tipo de apara mais curto e quebradiço ao contrário da liga com menor teor de chumbo, que apresenta uma apara longa indesejável, apresentada no gráfico da Figura 4.17 a), b) e c). De um modo geral, constata-se que a diminuição do teor de chumbo apresenta um efeito negativo no tipo de apara desejada no processo. Tal é verificado para qualquer dos parâmetros de corte estudados, já que para a mesma velocidade de corte ou avanço, a diminuição do teor de chumbo introduz aparas cada vez mais longas. O mesmo acontece para a profundidade de corte.



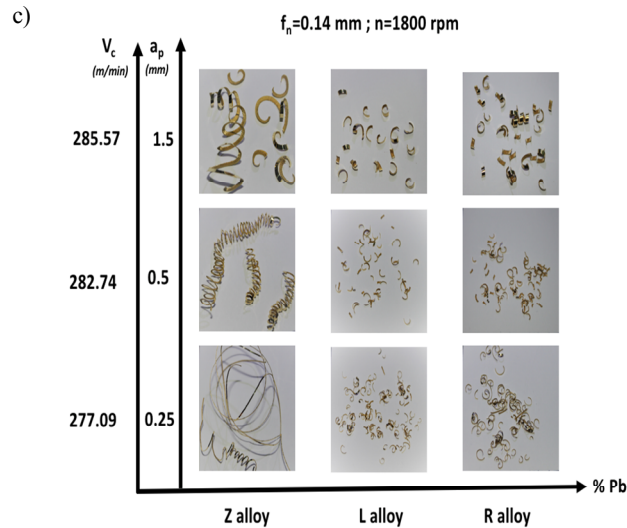


Figura 4.17– Influência da velocidade de corte, avanço e penetramento no tipo de apra gerada.

4.4 Análise ANOVA

Além do tratamento e da análise dos resultados de modo empírico sobre a forma de gráficos, incluiu-se uma análise com maior rigor matemático e estatístico, utilizando para tal uma análise de variância, *ANALYSIS OF VARIANCE* (ANOVA) sobre os dados mensuráveis que permitem caracterizar a maquinabilidade das ligas de latão. O objetivo desta análise é perceber se, estatisticamente, uma variável tem ou não influência no resultado final e detetar incompatibilidades com os resultados apresentados. As variáveis de entrada e suas interações utilizadas neste estudo foram V_c , f_n , a_p , $V_c \cdot a_p$, $V_c \cdot f_n$ e $a_p \cdot f_n$ para os resultados F_c , K_s , P_c , R_a , R_{max} e R_z . Nas Tabelas 4.8, 4.9 e 4.10 a seguir apresentadas são apresentadas as contribuições de cada um dos parâmetros de corte para os resultados obtidos para as ligas L, R e Z, respetivamente.

Tabela 4.8 - Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga L

Variável	F_c		K_s		P_c		R_a		R_{max}		R_z	
	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%
V_c	0.0072	0.0	0.0001	3.0	0.0001	17.4	0.9814	0.0	0.3856	0.0	0.8777	0.0
a_p	0.0001	60.6	0.0001	8.4	0.0001	40.5	0.0001	0.2	0.1320	0.2	0.0001	0.4
f_n	0.0001	27.1	0.0001	76.6	0.0001	18.5	0.0001	99.5	0.0001	93.7	0.0001	98.5
$V_c \cdot a_p$	0.0002	0.1	0.0001	6.3	0.0001	8.8	0.0430	0.0	0.4223	0.0	0.3549	0.0
$V_c \cdot f_n$	0.0031	0.1	0.0680	0.4	0.0001	3.7	0.0217	0.0	0.1267	0.3	0.6621	0.0
$a_p \cdot f_n$	0.0001	11.9	0.0013	1.4	0.0001	8.0	0.0001	0.2	0.0010	1.6	0.0001	0.7
Resíduo		0.2		4.0		3.0		0.2		4.3		0.6

Tabela 4.9 - Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga R

Variável	F _c		K _s		P _c		R _a		R _{max}		R _z	
	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%
V _c	0.0684	0.1	0.6674	0.0	0.0001	18.4	0.9156	0.0	0.9737	0.0	0.8734	0.0
a _p	0.0001	58.9	0.0001	13.1	0.0001	38.4	0.0001	0.4	0.0001	2.2	0.0001	1.4
f _n	0.0001	28.6	0.0001	63.7	0.0001	19.6	0.0001	98.6	0.0001	90.8	0.0001	95.0
V _c ·a _p	0.0789	0.1	0.5069	0.0	0.0001	8.2	0.9227	0.0	0.7328	0.0	0.9872	0.0
V _c ·f _n	0.0252	0.2	0.6009	0.0	0.0001	4.4	0.9960	0.0	0.9874	0.0	0.9807	0.0
a _p ·f _n	0.0001	11.0	0.2728	0.6	0.0001	7.5	0.0001	0.5	0.0004	2.4	0.0001	1.4
Resíduo		1.1		22.5		3.5		0.6		4.6		2.2

Tabela 4.10 - Valor P e contribuição percentual das variáveis, segundo o teste ANOVA, para a liga Z

Variável	F _c		K _s		P _c		R _a		R _{max}		R _z	
	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%	P	%
V _c	0.0002	0.1	0.0001	17.5	0.0001	13.8	0.9221	0.0	0.9692	0.0	0.9543	0.0
a _p	0.0001	55.7	0.0001	12.2	0.0001	29.8	0.0001	0.7	0.0049	16.9	0.0053	16.2
f _n	0.0001	29.1	0.0001	36.3	0.0001	21.1	0.0001	98.4	0.0101	13.8	0.0054	16.1
V _c ·a _p	0.3754	0.0	0.0001	13.1	0.0001	7.7	0.5616	0.0	1.0000	0.0	1.0000	0.0
V _c ·f _n	0.8396	0.0	0.2110	0.8	0.0001	3.6	0.0052	0.0	1.0000	0.0	1.0000	0.0
a _p ·f _n	0.0001	15.0	0.4328	0.0	0.0001	10.5	0.0001	0.7	0.4865	0.0	0.4857	0.0
Resíduo		0.2		20.1		3.4		0.2		69.2		67.7

Para as três ligas em análise, a gama de velocidade de corte testada não tem praticamente influência na força de corte, enquanto que a_p e f_n são os fatores que mais contribuem, por esta ordem de importância, sendo que a restante contribuição para F_c é dada pela interação $a_p \cdot f_n$ com pesos de 60, 30 e 10%, respetivamente.

Pela técnica de análise da ANOVA, constatou-se que, para as ligas L e R, secção (S) dada pelo produto dos parâmetros a_p e f_n (até aqui analisados em separado) traduziu uma variação pouca significativa no valor de K_s bem como a velocidade de corte, sendo que o avanço tem um peso superior a 65% em termos de influência, enquanto que a_p tem uma contribuição de perto de 10%. No caso da liga Z, a velocidade de corte, o penetramento e a combinação $V_c \cdot a_p$ assumem um efeito significativo com uma contribuição de 17.5%, 12% e 13%, respetivamente. O avanço se destaca como principal influência (36%). Apesar desta análise feita para as três ligas, no caso das ligas R e Z o erro é relevante (20%), levando a análises não conclusivas.

Quanto aos valores de P_c , revela-se uma dependência de todas as variáveis, com maior incidência em a_p , f_n e V_c , pela ordem apresentada. Fisicamente, este resultado é bastante coerente, dado que a variação de qualquer uma das entradas irá afetar a energia necessária para o processo.

Nas rugosidades (R_a , R_{max} e R_z), para as ligas L e R, f_n é praticamente o único fator responsável, tendo uma contribuição geral de mais de 95%. Para a liga Z, o efeito de f_n em R_a é idêntico, sendo que para R_{max} e R_z , os resultados são pouco conclusivos, devido ao erro associado.

5 Processo produtivo na Grohe Portugal

Em Portugal, a Grohe encontra-se sedeadada em Albergaria-a-Velha e iniciou a sua atividade em 1998. Esta unidade fabril funciona durante seis dias por semana, 24 horas por dia, e os seus operadores trabalham em regime de quatro turnos rotativos de oito horas cada um. Conta com a colaboração de cerca de 900 funcionários, o que aliada ao facto de apresentar um grande desenvolvimento ao nível tecnológico permite atingir uma produção na ordem dos 10 mil componentes diariamente, sendo que a grande maioria desta produção são destinados à exportação. Nesta unidade fabril são produzidos, essencialmente, corpos para torneiras. Contudo, recorre-se à subcontratação, adquirindo-se os restantes componentes, bicas e manípulos de abertura, para que no departamento de montagem se possa terminar o processo de construção da torneira. Assim, nesta secção far-se-á feita uma breve apresentação da produção do corpo de uma torneira, desde momento em que entra como matéria prima para o processo de fundição, até ao momento que sai como produto final embalado do processo de montagem.

5.1 Macharia e Fundição

Na macharia são produzidos os machos utilizados para a obtenção de cavidades no interior do corpo da torneira a produzir por fundição. Os machos de areia são produzidos através do processo de caixa quente (*hot-box*). Este processo é iniciado com a introdução da mistura de areia no interior das caixas de machos com a configuração que se pretende obter. De seguida utiliza-se um catalisador, num processo de cura térmica no interior da caixa, onde são atingidas temperaturas de 220°C, de tal forma que se verifica uma aceleração do processo químico da resina conferindo rigidez à areia. O processo é concluído com operações de acabamento manuais nos quais é feita a remoção de canais excedentários, utilizando-se sobretudo lixas para a conclusão desta etapa.

Após a obtenção do latão no estado líquido na fusão central, dá-se continuidade ao processo com o transporte deste material para os fornos de manutenção que estão incorporados em cada posto de trabalho, de forma a manter a liga sempre à temperatura necessária. Existe um sistema que permite obter informações, em tempo real, da quantidade de material existente no interior dos fornos, de modo a que se garanta o seu funcionamento contínuo, impedindo paragens desnecessárias do equipamento, uma vez que estas causam um custo desnecessário ao processo.

A obtenção de corpos fundidos é feita segundo dois processos: fundição por gravidade e fundição por baixa pressão. Existem dois centros de fundição por gravidade e quatro centros de fundição por baixa pressão. Após a colocação dos machos no interior das coquilhas de cobre, estas são devidamente fechadas e preparadas para o vazamento. De seguida, o material fundido é vazado no interior da coquilha de modo a preencher o espaço vazio existente entre a coquilha e o

macho, dando assim origem à peça ou cacho (conjunto de peças ligadas entre si pelos canais de enchimento). Na Figura 5.1 é apresentada uma coquilha de cobre e a colocação do macho de areia no interior da coquilha.

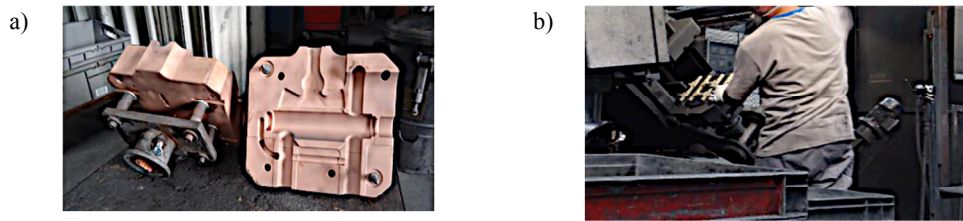


Figura 5.1 - a) Coquilha de cobre; b) Alocação do macho de areia no interior da coquilha.

Depois das peças produzidas, o passo seguinte é a separação do cacho que se faz recorrendo a máquinas de serra-fita manuais ou automáticas, Figura 5.2 a) e b), respetivamente. Aqui obtêm-se os corpos da torneira em bruto. Todo o latão que não seja considerado como “útil” ao processo, como é o caso das peças defeituosas, alimentadores ou gitos, são separados nestas etapas e seguem diretamente para a sucata, para voltarem ao início do processo, ou seja, à fusão central.

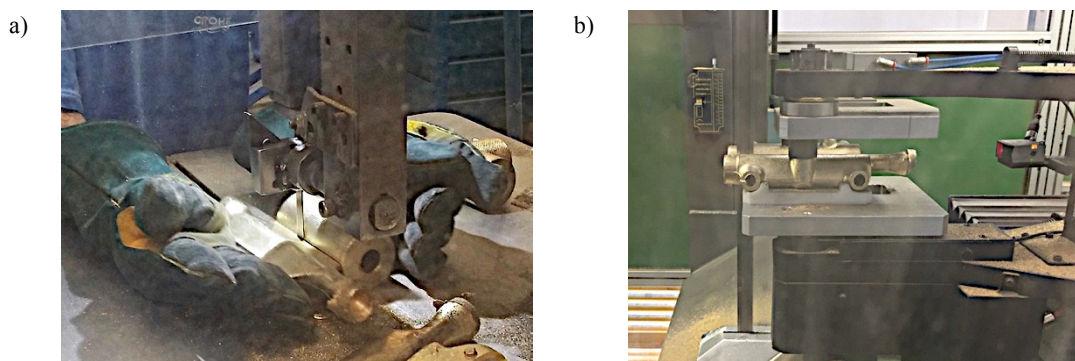


Figura 5.2 – Processo de corte manual em a) e de forma automática em b).

As peças boas seguem para o processo de granalhagem onde será removida a areia utilizada nos machos por jateamento de esferas metálicas a grandes velocidades no interior das cavidades dos componentes, sendo que no caso do processo de corte ser automático, a granalhagem ocorre antes deste processo. Concluída esta operação, são obtidos os corpos das torneiras livres da maior parte da areia e excessos metálicos que possam existir no seu interior.

Depois de todas estas tarefas realizadas, encontra-se finalizado o processo de produção neste departamento, sendo os vários corpos das torneiras inspecionados e armazenados, para que possam ser transferidos para o departamento da maquinagem.

5.2 Maquinagem

Os corpos chegam ao departamento de maquinagem, oriundos do processo de fundição. Aqui é feita a remoção do material excessivo do corpo da torneira. Para tal, recorrem-se a diversas

operações como a roscagem, furação ou a realização de chanfros. De acordo com o plano de produção estabelecido, é efetuada a distribuição dos corpos para maquinar pelos doze centros de maquinagem CNC existentes. Após a obtenção dos corpos maquinados, são realizados controlos de inspeção visual, onde é testada a qualidade das furações e roscas do corpo da torneira. Através de calibres “passa/não passa”, é feita a aceitação ou rejeição do corpo ou do lote em questão.

Ainda neste departamento, mas já depois de terem sido realizadas as operações de maquinagem, faz-se a lavagem e o desgorduramento das peças, seguido do teste de estanquidade que, através de um sistema pneumático, verifica a existência de fugas de ar nos corpos. Caso não passem no teste funcional, as peças são impregnadas com resinas e testadas novamente. Após este teste, as peças que forem rejeitadas são consideradas “sucata”, sendo enviadas de novo para a fundição, onde serão reaproveitadas, sendo que aquelas que passam no referido teste seguem para o processo de Lixamento/Polimento.

O processo produtivo neste departamento inicia-se com o desenvolvimento do programa CNC para a peça a trabalhar. Simultaneamente, é feito um trabalho com os fornecedores das ferramentas de corte para a construção destas. São também definidos os mordentes responsáveis pela fixação da peça à máquina de modo a que esta se mantenha estável. As ferramentas para os corpos a maquinar são especiais, uma vez que são ferramentas de perfis e que, por norma, são adequadas para a maquinagem de um só produto.

Concluída a etapa de preparação e estudo do processo, é construído um mapa de ferramentas, onde são colocados os desenhos das peças, as ferramentas e suportes a utilizar. Neste mesmo mapa é indicado o tipo de teste que deve ser feito de duas em duas horas (ou de três em três horas, consoante o centro CNC) com recurso a calibres “passa/não passa”, representados na Figura 5.3 a) e pelo Gabari apresentado na Figura 5.3 b), permitindo assim que seja feito um controlo dimensional das operações aqui feitas. Desta forma, é garantido que as peças, ao chegarem à etapa de montagem, não têm problemas para encaixar nos restantes componentes.

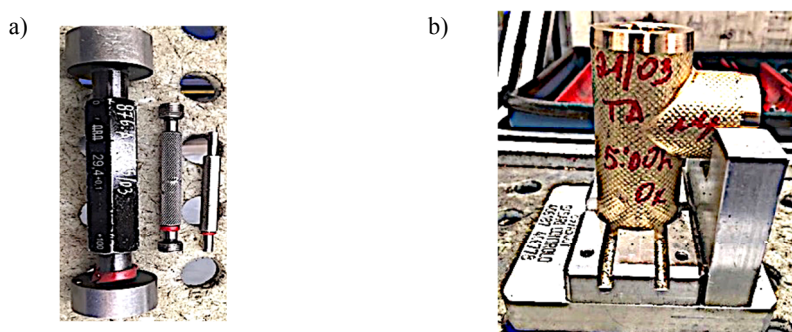


Figura 5.3 - Elementos de controlo: a) Calibres; b) Gabari.

No departamento da maquinagem são definidas três classes de operários: os ferramenteiros, os afinadores e os colaboradores. Os ferramenteiros são responsáveis por fazer a preparação das ferramentas, colocando-as nos suporte e fazendo a análise e registo das cotas das mesmas. Os afinadores são os sujeitos que colocam as ferramentas de corte nas máquinas, testam

e corrigem o processo. Os colaboradores fazem o abastecimento das máquinas e os testes de estanquidade aos produtos.

O departamento de maquinagem é, como todos os outros, um departamento com grande relevo no processo produtivo, onde as máquinas CNC são capazes de elevadas taxas de produção, cerca de 10 mil peças por dia.

5.2.1 Ferramentas de corte

Tendo em conta que é produzido um elevado número de peças do mesmo modelo, diariamente, a empresa optou por recorrer a ferramentas de corte personalizadas. Assim, existe um trabalho conjunto com os fornecedores, de modo a garantir que a ferramenta é potenciada no que diz respeito à sua vida útil e à qualidade que oferece. De acordo com os fabricantes, apenas o ângulo de ataque do inserto é controlado e é igual a 6° . Todos os restantes ângulos são dimensionados consoante o processo, de modo a permitir uma correta operação.

As ferramentas de corte utilizadas na empresa são ferramentas especiais, capazes de reproduzirem perfis singulares, sendo que muitas vezes são adequados à produção de um único produto, acabando depois por se tornarem obsoletas. São também utilizadas ferramentas *standard*, como brocas ou fresas. Ao nível dos materiais, verifica-se a utilização do metal duro aplicado, essencialmente, sob a forma de insertos brasados e ainda aço rápido (HSS) utilizado como ferramenta integral. De forma residual, existem também algumas ferramentas em PCD. Contudo, não há dados que suportem o forte investimento que estas implicam. Um dos motivos que levam à resistência para a utilização deste material, tem a ver com a presença de areias no interior das peças, tal como é apresentado na Figura 5.4, o que promove o desgaste antecipado deste tipo de materiais, levando à impossibilidade de estas continuarem a operar prematuramente, além do elevado investimento.

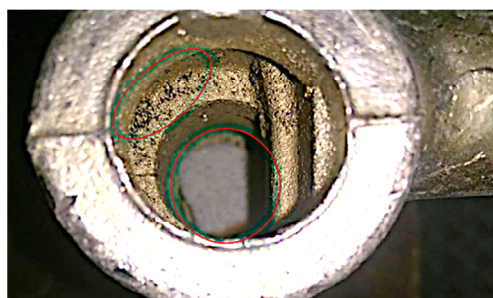


Figura 5.4 - Peça com areia alojada.

Uma das soluções adotadas para o melhoramento das condições de trabalho, permitindo o maior tempo de vida das ferramentas e melhores acabamentos superficiais, traduziu-se na introdução de canais internos de refrigeração.

A maioria das ferramentas utilizadas necessitam de um suporte para fixação na árvore da máquina. Assim, aquando da preparação destas ferramentas para que cumpram a sua função, deve

ser feita uma operação extra que consiste em analisar o suporte adequado à ferramenta e proceder à sua montagem. A principal vantagem deste facto tem a ver com uma maior versatilidade, uma vez, que alterando os suportes, podem alocar-se a ferramenta a outro centro de maquinagem.

5.2.2 Elementos de fixação da peça

Com vista à correta fixação da peça no interior do centro da maquinagem são utilizados mordentes tal como são apresentados na Figura 5.5. Estes mordentes funcionam por ação hidráulica e são adequados a cada modelo de peças que se pretende fabricar, sendo esta uma das razões dos tempos de *setup* para cada produto serem elevados.

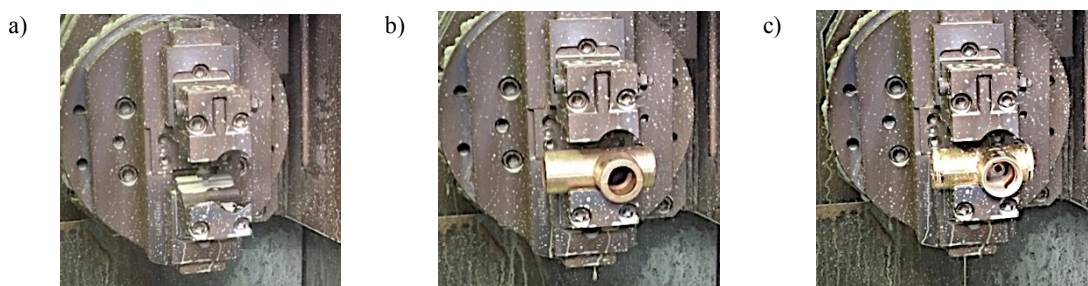


Figura 5.5 - Mecanismo de fixação da peça a maquinar: a) mordente vazio; b) mordente com a peça resultante da fundição; c) peça maquinada.

5.2.3 Operações, Parâmetros e Fluidos de corte

Nos equipamentos de maquinagem, as operações realizadas são, na grande maioria, a furação, a fresagem e roscagem (por macho ou interpolação com fresa), sendo o torneamento usado de forma residual. O abastecimento das peças às máquinas é manual, peça a peça, ou então por paletes, no caso dos centros mais avançados. Contudo, a Grohe Portugal tem acompanhado o desenvolvimento tecnológico e já se encontra instalado um robot, capaz de fazer a alimentação da máquina de forma autónoma.

No que concerne aos parâmetros de corte, verifica-se que a sua definição ocorre em função do perfil a maquinar, o tipo de liga utilizada e o conhecimento prévio relativo ao processo em causa. Os parâmetros de corte introduzidos na programação dos centros CNC são a velocidade de corte (V_c) definida através da frequência de rotação (n), e a velocidade de avanço da mesa ou ferramenta (V_f). Assim, tem-se que a velocidade de corte é função da operação a utilizar e varia entre os 150 e 400 m/min; para o avanço da ferramenta (f_n) verificam-se valores na ordem dos 0.10 a 0.15 mm/rot em operações de desbaste, sendo que em operações de acabamento são utilizados avanços de 0.05 mm/rot. A profundidade de corte é variável, pois as tolerâncias de fundição são muito grandes, fazendo a_p variar desde os 0.5 até os 2 mm. Tendo em conta os valores aqui apresentados, verifica-se que estes se encontram dentro da gama de valores ensaiados na maquinagem dos latões na Secção 4.3.

Devido às elevadas temperaturas e esforços de corte gerados pela elevada cadência de produção, são utilizados fluidos de corte líquidos, mais especificamente emulsões, constituídas por 5% óleo e a restante percentagem é água. Os fluidos, por norma, são aplicados a uma pressão de 10 bar na zona de corte.

5.3 Lixamento e polimento

Quando chegam a este departamento, os corpos são distribuídos pelos postos de lixamento manual (Figura 5.6 b)) e robots de lixamento automático (Figura 5.6 a)). Esta decisão é dependente da complexidade da peça e dos defeitos encontrados. O lixamento automático é caracterizado por uma maior cadência de peças e pela facilidade de automatização do sistema, o que permite a diminuição do tempo de trabalho sobre a peça, enquanto que o lixamento manual é utilizado sobretudo nas zonas de difícil acesso por parte dos robots, sendo por isso necessário realizar de forma complementar ao lixamento automático.



Figura 5.6 - Processo de lixamento automático (a)) e manual (b)).

No processo de lixamento, parte-se inicialmente com uma lixa grossa, isso é, apresenta grãos com maiores dimensões. Deste modo, são removidas rebarbas e outros materiais excedentes, provenientes da fundição da peça. De seguida, dá-se uma diminuição do tamanho do grão da lixa, passando assim a utilizar-se uma lixa fina, de modo a que se baixe a rugosidade superficial, melhorando o acabamento do corpo da torneira.

Terminado o lixamento, todas as peças são sujeitas a uma inspeção visual, sendo analisada cuidadosamente a superfície da torneira, para que se decida se esta pode avançar para a fase seguinte. Em caso de defeito, estes são assinalados no ponto da imperfeição e a peça volta ao posto do lixamento manual.

Concluída a etapa de lixamento, segue-se o polimento, que pode também ser feito de forma automática ou manual. No polimento automático são utilizadas máquinas de polimento CNC, sendo que as peças são polidas através da passagem de escovas rotativas de tecido. No final realiza-se uma inspeção aos corpos das torneiras, de modo a que seja controlada a qualidade da superfície da peça. No caso de se verificar algum defeito, principalmente irregularidades a nível de poros, riscos ou desvios de contorno, este deverá ser assinalado para a que possam ser

recuperadas pelo processo de polimento manual, por operários que apresentem uma maior experiência nesse tipo de trabalho. No caso de não ser possível fazer a recuperação, estas passam a ser “sucata”, voltando assim para o departamento de fundição, onde acabam por ser reaproveitadas.

5.4 Galvânica

Nesta etapa, estão sujeitas a tratamento, as peças produzidas internamente e as peças que são adquiridas ao exterior e que são necessárias à produção integral das torneiras. Estas são colocadas sobre suportes metálicos e percorrem três fases distintas. O processo inicia-se com a limpeza das peças, com o objetivo de as desengordurar para que seja precavida a contaminação dos banhos. De seguida, inicia-se a eletrodeposição do níquel (niquelagem) de modo a dar às peças um aumento da resistência à corrosão. Dá-se uma nova lavagem ao corpo das torneiras, seguindo-se a eletrodeposição de crómio (cromagem) para que se obtenha um aspeto superficial brilhante e cromado nas peças.

No final deste processo, verifica-se novamente um controlo de qualidade das peças, sendo que aquelas que são aprovadas seguem para o processo de montagem, enquanto que as peças que não cumprem os requisitos mínimos, têm de ser tratadas de modo a que seja removido o níquel e crómio depositado anteriormente. As peças são desniqueladas e descromadas principalmente por questões ambientais e económicas; para tal é habitualmente utilizado um banho ácido conferindo à peça uma tonalidade rosa. Se possível, as peças passam novamente pelos processos de lixamento, polimento e galvânica, e, no caso de não ser possível, as peças são consideradas “sucata”.

5.5 Montagem

A montagem é a ponta final do processo produtivo, uma vez que é neste departamento que se faz a montagem de todos os componentes constituintes das torneiras até obter o produto final pronto a ser comercializado. Este departamento possui cerca de 350 colaboradores, distribuídos por 33 linhas de montagem e seis linhas de pré-montagem. Nestas linhas, são executadas as quatro atividades principais: o controlo visual das peças, o teste de estanquidade e circulação (realizado com água), a montagem integral da torneira e por fim, a embalagem dos produtos.

Terminada a montagem, os produtos seguem para o armazém, sendo depois expedidos para a unidade fabril em Hemer, sede da Grohe AG, onde é feito o armazenamento de toda a produção realizada nas cinco fábricas Grohe, para que depois sejam expedidas para o cliente.

6 Estudo do tempo de vida e material das ferramentas de corte

O universo das ferramentas de corte está em constante desenvolvimento associado a um contínuo incremento da exigência do mercado. Na demanda pela obtenção de fatores que garantam uma maior durabilidade às ferramentas, permitindo com isso, uma redução de custos ou aumento da produtividade.

A nível industrial, dá-se um especial destaque às ferramentas em carbonetos sinterizados (metal duro) que permitem a combinação de elevada dureza com uma boa tenacidade. Os materiais ultra-duros, como o PCD, também apresentam excelentes características como a sua elevada dureza e, apesar do custo elevado, é um material cada vez mais aplicado. A utilização de revestimentos é também, cada vez mais, uma realidade na indústria pela garantia de dureza das ferramentas de corte, que se traduz num aumento da vida das mesmas. Contudo, no final, é preciso fazer um balanceamento entre o investimento e os resultados alcançados para se determinar qual a solução que melhores resultados apresenta.

No departamento de maquinaria um dos maiores gastos económicos está relacionado com as ferramentas de corte. E tal deve-se, em grande parte, à incapacidade definir o tempo de vida da ferramenta. Esta informação permite fazer uma gestão eficiente destas.

6.1 Identificação do caso de estudo

Tendo em conta o excessivo gasto de meios associado à inexistência de uma gestão eficiente de ferramentas de corte, pretende-se fazer um estudo do tempo de vida das ferramentas de corte, de modo a que seja possível identificar as razões que levam a esse desgaste e prevenir tal situação. É importante salientar a necessidade de detetar prematuramente o desgaste da ferramenta, permitindo que esta ainda possa ser reparada e assim garantir que os custos envolvidos sejam baixos. Caso contrário, as ferramentas de corte são levadas ao limite de tal forma que ocorre quebra do corpo e/ou dos insertos, o que acarreta avultados custos.

O tempo de vida das ferramentas nem sempre é fácil de controlar, já que são diversos os fatores que influenciam o processo de maquinaria. O desgaste das ferramentas é influenciado por fatores como a vibração da máquina ou fixação incorreta das ferramentas, fixação incorreta da peça nos mordentes ou o estado do material a maquinar (a areia do processo de fundição é um problema para o processo de maquinaria) faz com que muitas vezes, a vida da ferramenta seja levada até ao extremo verificando-se peças defeituosas na produção. Feita uma análise global às

ferramentas inoperacionais, constatou-se que apresentam essencialmente aresta postiça, deformação plástica/amaciamento do gume, craterização, e por vezes, entalhes e/ou fraturas.

6.2 Procedimento experimental

Os testes de apuramento do tempo de vida de algumas das ferramentas de corte, utilizadas na empresa, realizaram-se em pleno processo produtivo. Desta forma, os dados retirados traduzem uma situação real e podem, futuramente, ser utilizados para as demais ferramentas. Tentou-se, sempre que possível, garantir a repetibilidade dos ensaios, mantendo-se constantes as fontes de perturbação. Para tal, foram mantidos os equipamentos utilizados, bem como os procedimentos de manuseamento e de análise de desgaste.

6.2.1 Peça a maquinar

Para o teste do tempo de vida das ferramentas de corte, optou-se pela escolha de um produto que se encontrasse em produção interruptamente, uma vez que assim é garantida uma mínima aleatoriedade dos fatores externos. Assim foi escolhido o produto apresentado na Figura 6.1. As ferramentas de corte em análise não serão removidas do centro de maquinagem, a não ser que se verifique o desgaste ou quebra destas. As peças do referido produto são feitas na liga anteriormente designada por Grohe Light.

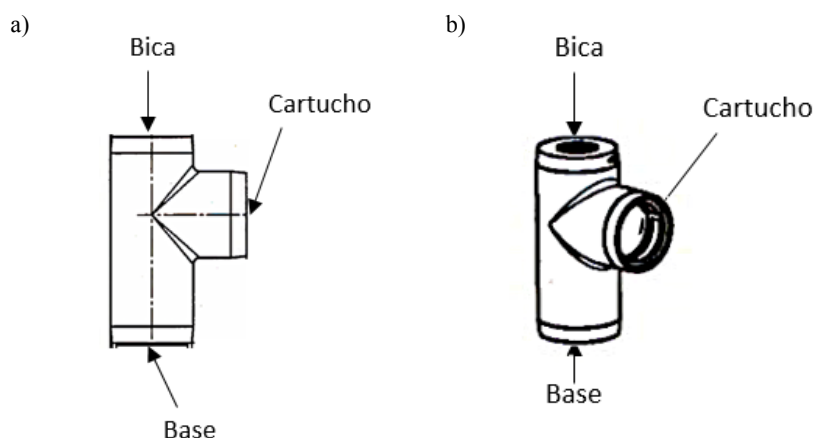


Figura 6.1 - Desenho da peça a maquinar: a)2D; b) 3D.

Na Figura 6.2 apresenta-se a comparação entre o estado da peça antes e após ser maquinado, para que seja mais facilmente perceptível o tipo de operações que se desejam realizar. Na Figura 6.3 é apresentado o estado final do produto.

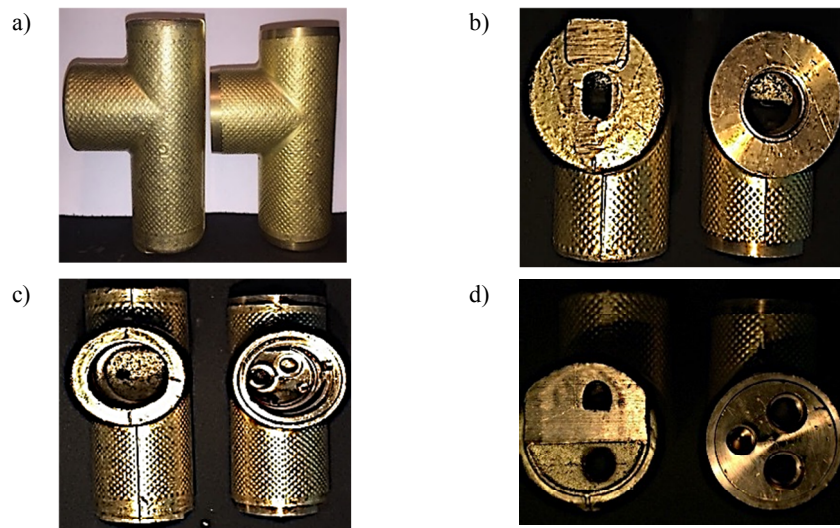


Figura 6.2 - Peça antes e depois de ser maquinada: a) vista lateral; b) vista de cima; c) vista de frente; d) vista de baixo.



Figura 6.3 - Produto final com o corpo analisado [1].

6.2.2 Ferramentas de corte

A escolha das ferramentas para análise foi feita de acordo com os maiores consumos de ferramentas verificados no mês de janeiro de 2018, uma vez que correspondem às ferramentas que mais vezes necessitaram de ser reparadas e/ou afiadas. Assim, para o produto em causa, estima-se que sejam aquelas que apresentam menor tempo de vida, para que desta forma seja possível retirar conclusões em tempo útil, isto é, no tempo em que recorrer o estágio.

Estas ferramentas são responsáveis por fazer o desbaste da peça até garantir a cota exterior de 40.6 mm em todos os casos. Esta não será alterada por nenhuma operação de acabamento (na maquinagem). Relativamente ao tempo de vida, os elementos da equipa que maior contacto tem com as ferramentas de corte, estimam que estas sejam capazes de produzir cerca de 2500 peças. As ferramentas de corte seleccionadas foram o broqueador de desbaste do

cartucho representado na Figura 6.4 a), o broqueador da base representado na Figura 6.4 b) e o broqueador de desbaste da bica representado na Figura 6.4 c).

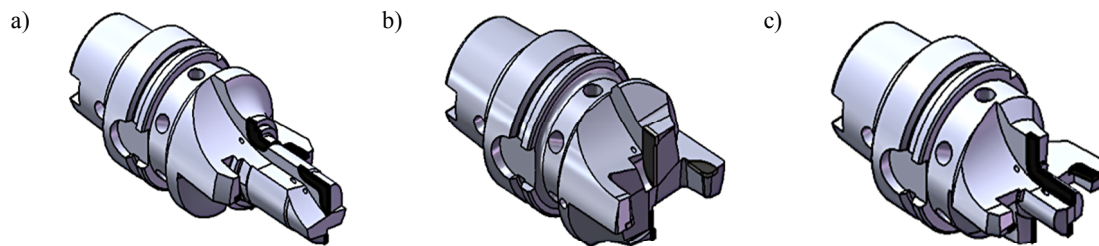


Figura 6.4 – Ferramentas em análise: a) Broqueador de desbaste do cartucho; b) Broqueador da base; c) Broqueador de desbaste da bica.

À exceção do broqueador da base, as restantes ferramentas aqui mencionadas contam com ferramentas complementares de acabamento. Ao nível das arestas de corte, nestas ferramentas, podem salientar-se os buris laterais que são responsáveis por garantir a cota exterior acima referida, as pastilhas de corte da base, que têm como função fazer o desbaste (e acabamento, no caso do broqueador da base) de modo a que sejam alcançadas dimensões próximas daquelas que serão garantidas pelas ferramentas de acabamento. Por fim, é importante salientar arestas de corte do tronco central (junto ao eixo de rotação) da ferramenta que são responsáveis apenas por fazer alargamento dos furos no interior do corpo, enquanto que as arestas de corte no topo da ferramenta realizam a abertura desses mesmos furos.

6.2.3 Caracterização das operações e parâmetros

As ferramentas escolhidas realizam sobretudo furação. Contudo, permitem também fazer chanfros e perfis de acordo com a sua configuração. Para tal, são definidos como parâmetros de corte pelo programador CNC apenas a frequência de rotação da ferramenta (n) e a velocidade de avanço da ferramenta (V_f) e como é óbvio a profundidade de corte da ferramenta (a_p), isto é, estabelecer a distância percorrida pela ferramenta no processo de furação. Para a ferramenta de desbaste da bica é definida uma profundidade de furação de 20 mm, sendo que a velocidade de avanço da ferramenta (V_f) toma o valor de 300 mm/min ($f_n=0.15$ mm/rot) e a uma frequência de rotação de 2000 rpm. Para as restantes ferramentas em análise, a velocidade de avanço da ferramenta deixa de ser constante, de forma a que seja garantida uma melhor definição do perfil e um melhor escoamento da apara gerada no degrau anterior. Assim, para a ferramenta de desbaste do cartucho, a velocidade de avanço da ferramenta (V_f) é de 500 mm/min ($f_n=0.5$ mm/rot) a 1000 rpm, sendo que os últimos 10 mm de maquinagem são realizados a uma frequência de rotação de 1400 rpm e com a velocidade de avanço da ferramenta a 300mm/min ($f_n=0.214$ mm/rot). O broqueador da base é utilizado a uma frequência de rotação constante de 1100 rpm e realiza 6 mm com a velocidade de avanço da ferramenta a 400mm/min ($f_n=0.364$ mm/rot), os 5 mm restantes são maquinados com $V_f=30$ mm/min ($f_n=0.027$ mm/rot).

6.3 Variantes do estudo

6.3.1 Ferramentas em metal duro

A ferramenta é composta por um corpo de aço 42CrMo4 e com insertos de metal duro brasados. As suas propriedades encontram-se entre os valores definidos para o grupo K10 e K40, sendo que a dureza apresenta valores na ordem dos 1300-1650 HV. Relativamente à geometria dos insertos utilizados, apenas é conhecido o ângulo de ataque, de 6°, enquanto que, todos os outros foram estabelecidos de modo a que a ferramenta execute a furação sem qualquer interferência com a peça. As ferramentas de metal duro ensaiadas contam com a particularidade de possuírem os buris laterais amovíveis.

Para assegurar a ligação da ferramenta ao centro de maquinagem, foi utilizado um suporte do tipo AD, segundo a norma DIN 69871. Na Figura 6.5 é apresentada a configuração das ferramentas de metal duro necessárias a obter a configuração das peças apresentadas na Figura 6.2.

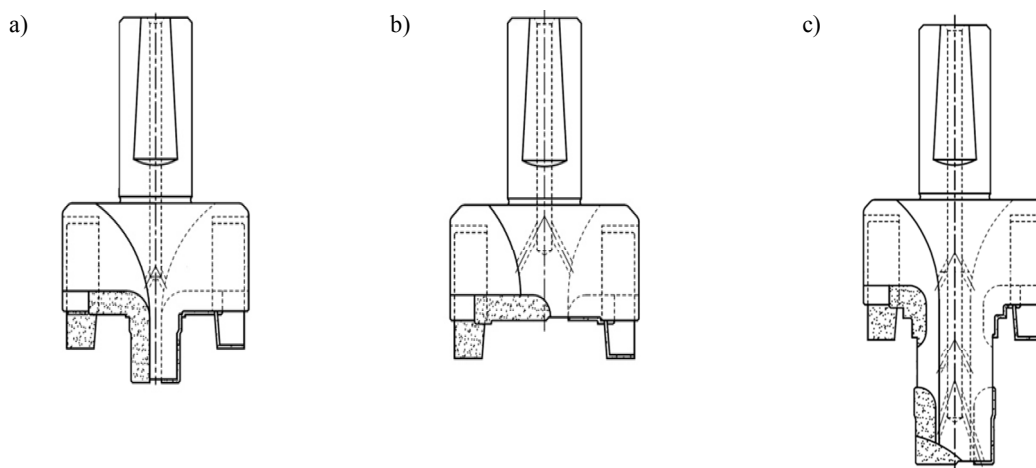


Figura 6.5 - a) Broqueador de desbaste da bica; b) Broqueador da base; c) Broqueador de desbaste do cartucho.

As ferramentas apresentadas foram então colocadas no centro de maquinagem e o critério para que estas fossem retiradas de produção traduziu-se na sua incapacidade de cumprir cotas especificadas ou no pior dos casos estas partirem alguma das arestas de corte e deste modo aparecerem peças defeituosas na produção. Nas Tabelas 6.1, 6.2 e 6.3 apresentam-se os resultados das principais arestas de corte antes e depois do ensaio feito para o broqueador de desbaste do cartucho, para o broqueador de desbaste da bica e para o broqueador da base, respetivamente.

Tabela 6.1 - Resultados do ensaio ao broqueador de desbaste do cartucho em metal duro

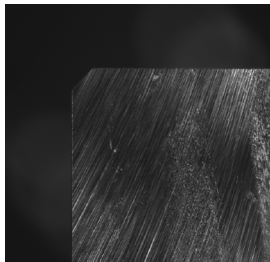
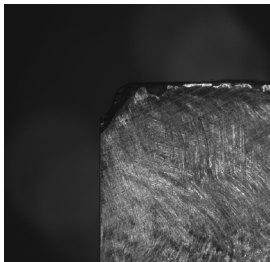
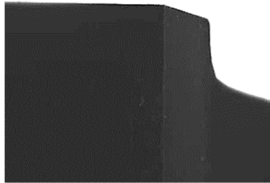
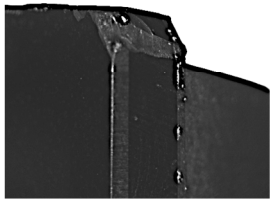

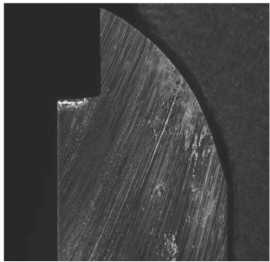
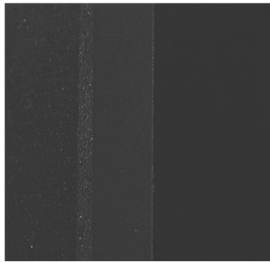
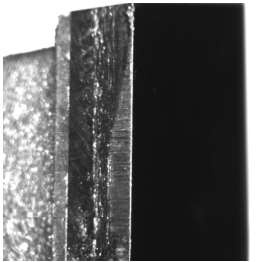
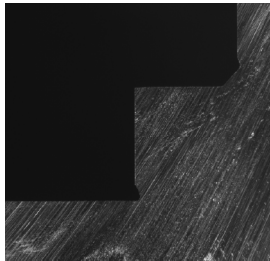
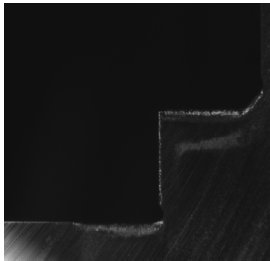
Pré-Teste	Após Teste	Pré-Teste	Após Teste
			
			
			

Tabela 6.2 - Resultados do ensaio ao broqueador de desbaste da bica em metal duro

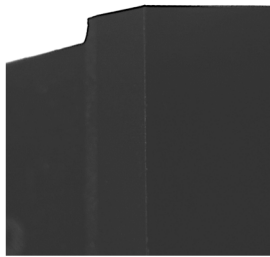
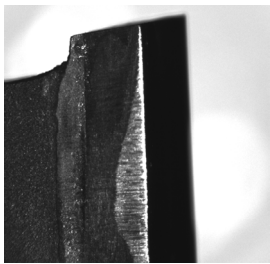

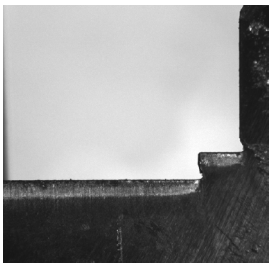
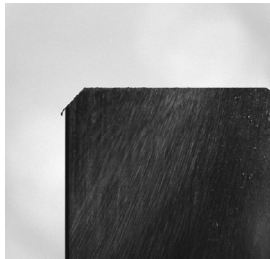
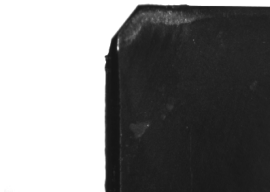
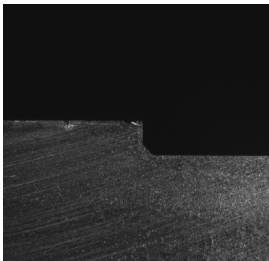
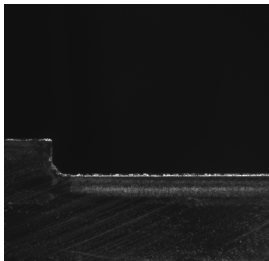
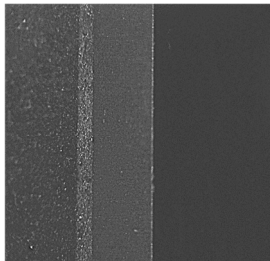
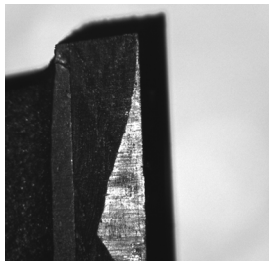
Pré-Teste	Após Teste	Pré-Teste	Após Teste
			
			

Tabela 6.3 - Resultados do ensaio ao broqueador da base em metal duro

Pré Teste	Após Teste	Pré Teste	Após Teste
			

Feita a análise aos resultados expressos nas tabelas acima apresentadas, faz-se na Tabela 6.4 um resumo do número de peças produzidos e o motivo pelo qual foram retiradas as ferramentas do processo produtivo. É de salientar que o número de peças produzido por qualquer uma das ferramentas foi bem superior àquele que era inicialmente esperado.

Tabela 6.4 - Análise aos resultados dos ensaios em metal duro

Ferramenta de corte	Número de peças produzidas	Motivo de remoção da ferramenta da produção
Broqueador Desbaste Cartucho	9010	Desgaste dos buris – deixaram de garantir a cota exterior
Broqueador Desbaste Bica	10552	Desgaste excessivo dos buris e das arestas de corte do topo que promoveram uma superfície rugosa
Broqueador da Base	11964	Desgaste dos buris – deixaram de garantir a cota exterior

6.3.2 Ferramentas em PCD

Como foi visto anteriormente um dos fatores que pode influenciar o tempo de vida da ferramenta pode ter a ver com o tipo de construção utilizada. Para as ferramentas em PCD, cujos os desenhos se encontram apresentados na Figura 6.6, verifica-se que serão utilizados suportes incorporados com as ferramentas, além de buris fixos com arestas de corte para garantir o contorno exterior da base (no metal duro estas arestas estavam nos buris amovíveis). É apresentada na Figura 6.7 a configuração do pormenor descrito.

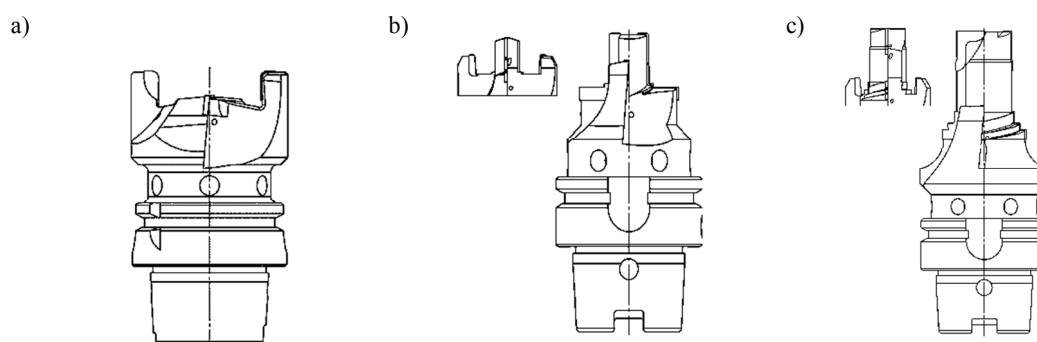


Figura 6.6 - a) Broqueador da base; b) Broqueador de desbaste da bica; c) Broqueador de desbaste do cartucho.

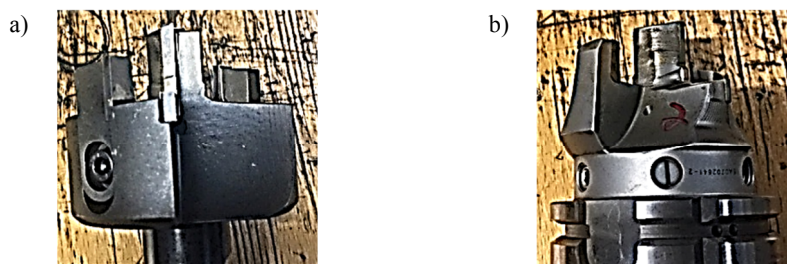


Figura 6.7 – a) Buris amovíveis nas ferramentas em metal duro; b) Buris não amovíveis nas ferramentas de PCD.

Tendo em conta que se tratou da introdução de este tipo de ferramentas (desbaste em PCD) na empresa, verificam-se muitos fatores que foram impossíveis de contornar como o erro na construção das ferramentas, assim o período que as ferramentas estiveram inoperacionais (fora da empresa) inviabilizou algumas das variáveis do estudo a realizar. Na Figura 6.8 encontra-se uma peça defeituosa que levou à reclamação de uma das ferramentas de corte.



Figura 6.8 - Peça defeituosa resultante do erro de construção do broqueador da base.

Por motivos enunciados em anteriormente, verificou-se a impossibilidade de fazer uma análise a todas as ferramentas de corte. Contudo, nas Tabelas 6.5 e 6.6 apresentam-se os resultados dos ensaios realizados pelas ferramentas testadas em PCD enquanto que na Tabela 6.7 são apresentados os números de peças realizadas e os motivos pelos quais estas saíram de produção.

Tabela 6.5 - Resultados do ensaio ao broqueador de desbaste da bica em PCD

Pré-Teste		Após Teste	

Tabela 6.6 - Resultados do ensaio ao broqueador de desbaste do cartucho em PCD







Pré-Teste	Após Teste	Pré-Teste	Após Teste
			
			

Tabela 6.7 - Análise aos resultados dos ensaios em metal duro

Ferramenta de corte	Número de peças produzidas	Motivo de remoção da ferramenta da produção
Broqueador Desbaste Cartucho	5131	Quebra da pastilha de corte
Broqueador Desbaste Bica	28334	Desgaste das arestas de corte e lascamento da aresta
Broqueador da Base	-	Ferramenta em reparação

6.4 Análise e discussão dos resultados

Apesar do PCD poder trabalhar com parâmetros de corte mais elevados, como velocidades de corte ou frequências de rotação, aumentando a produtividade, optou-se por fazer uma comparação entre os diferentes materiais para as pastilhas das ferramentas de corte em função do número de peças produzidas para os mesmos parâmetros de corte.

Na Tabela 6.8 são apresentados os custos das ferramentas de corte, novas e reparadas, para os diferentes materiais das ferramentas para as mesmas condições (tipo de suporte). Tendo em conta a relação de custos apresentada, para que se possa considerar o PCD vantajoso relativamente ao metal duro, este deverá fazer pelo menos 3 vezes mais peças.

Tabela 6.8 - Custos associados às ferramentas em análise

Ferramenta	PCD		Metal Duro		€/PCD/€/MD	
	Novas (€)	Reparadas (€)	Novas (€)	Reparadas (€)	Novas	Reparadas
Broq. Desb. Cartucho	707.2	458	228	105	3.1	4.4
Broq. Desb. Bica	618.8	373.8	212	92	2.9	4.1
Broq. Base	542.3	325.2	196	85	2.8	3.8

Analisando os resultados, verificou-se a inoperacionalidade das ferramentas de metal duro analisadas tem que ver, essencialmente, com o desgaste sofrido ao nível dos buris laterais. Tendo em conta que as propriedades mecânicas deste tipo de materiais são função do tamanho de grão, da contiguidade do carboneto, da distância média do ligante ou da fração volúmica das fases, seria interessante avançar para uma categoria de metal duro (através da alteração de alguns destes parâmetros) que assegurasse um melhor compromisso de resistência ao desgaste e tenacidade.

No caso das ferramentas de PCD constatou-se que estas foram retiradas de produção, já que é verificada quebra das arestas de corte. Ora, este problema vai de encontro àquilo que era previsto, já que a baixa tenacidade deste material dá início a uma fenda que tende a propagar-se rapidamente quando contacta com superfícies irregulares resultantes do processo da fundição e que termina com a fratura da pastilha de corte.

Por esta razão é perceptível a diferença de preços associada à reparação destas ferramentas. Para o metal duro é feita dessolda das pastilhas de corte, o seu afiamento e solda no mesmo corpo da ferramenta de modo a que esta fique de acordo com as dimensões pré-estabelecidas, enquanto que para o PCD tal não acontece uma vez que é necessário fazer a substituição integral das pastilhas de corte.

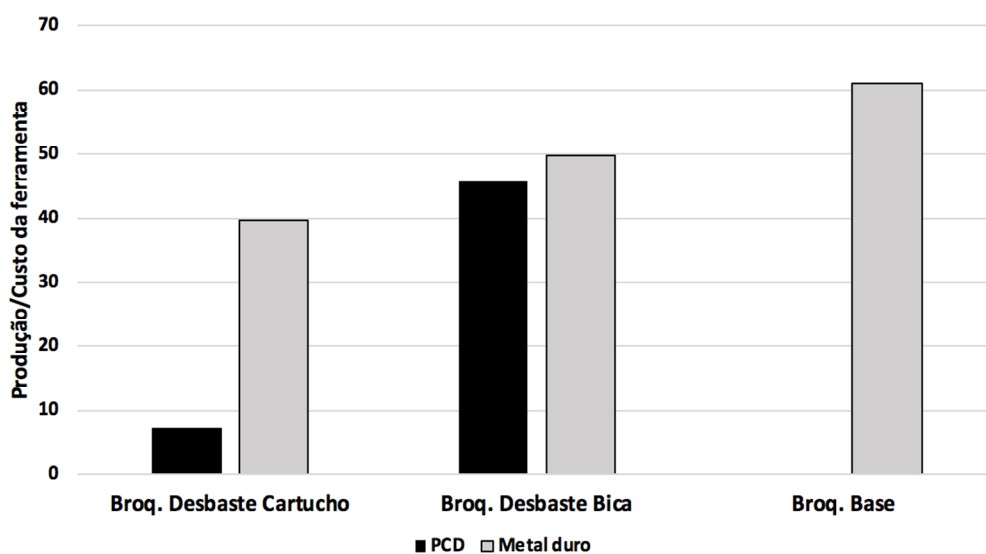


Figura 6.9– Comparação do rácio produção por custo da ferramenta para o metal duro e PCD.

O gráfico da Figura 6.9 mostra que o broqueador de desbaste da bica apresentou resultados interessantes, já que a ferramenta em PCD fez praticamente o triplo das peças que a ferramenta em metal duro. Enquanto, que o broqueador de desbaste do cartucho apresentou resultados bastantes pessimistas. Contudo, uma outra análise pode ser feita no sentido de avaliar o custo de uma dada ferramenta para fazer uma dada quantidade de peças. Estipulando que se pretende fazer 50000 unidades utilizando o broqueador de desbaste da bica e, considerando que as ferramentas ficam inoperacionais por desgaste das arestas de corte, verifica-se que a ferramenta em metal duro acabava por ficar por metade do preço, uma vez que para o número de peças produzidas obtido este broqueador teria de ser reparado cinco vezes com um custo de reparação quatro vezes menor que o PCD (que deveria ser reparado 2 vezes).

Por outro lado, da análise ao número de peças produzidas não se pode concluir que o PCD não possa ser utilizado para fazer o desbaste das peças fundidas, uma vez que no caso do broqueador de desbaste da bica foram alcançados resultados prometedores. Contudo, é necessário fazer uma análise ao tipo de operação realizada porque a dimensão das ferramentas pode ser uma das razões que levou ao desfasamento de resultados.

A principal razão que levou a empresa a testar o PCD nas ferramentas de corte tem a ver com as propriedades que oferece, no entanto, estes bons resultados são obtidos sobretudo na maquinagem de materiais como o alumínio que além de apresentar uma dureza inferior à do latão, apresenta também uma elevada condutividade térmica, o que permite uma dissipação do calor de forma mais eficaz. Este facto, pode ser também uma justificação para os valores obtidos já que a elevadas temperaturas ocorre a transformação do diamante em grafite, baixando de forma significativa a dureza e resistência ao desgaste do material.

No que diz respeito ao estudo do tempo de vida das ferramentas de corte, este trabalho experimental (e a análise ao processo produtivo da secção de maquinagem da empresa) permitiu averiguar que quando uma ferramenta que tem a função de desbaste deixa de cumprir a sua função, é a ferramenta de acabamento que acaba por fazer os dois trabalhos (acabamento e desbaste) reduzindo assim significativamente o seu tempo de vida. Uma vez identificado o número de peças que cada uma das ferramentas faz, deverá ser introduzido um contador no centro de maquinagem fazendo com que ao fim do ciclo a ferramenta saia para reparação. Assim, é assegurada uma redução do custo de reparação (já que um afiamento ou reperfilamento acaba por ser mais barato que uma substituição de pastilhas de corte) e o aumento do tempo de vida da ferramenta de acabamento. Desta forma, consegue-se também a diminuição do tempo que a máquina está parada, já que à medida que o contador tende para o fim deverá ser preparada uma ferramenta para a substituição imediata.

7 Caracterização experimental de esforços de corte e modelação

Nesta secção será feita uma análise aos esforços de corte desenvolvidos pelas ferramentas em análise no processo produtivo. Assim, este estudo tem como objetivo fazer a comparação entre os valores obtidos por ensaios experimentais que, numa fase posterior, deverão ser verificados com recurso a formulações de modelos mecanicistas de previsão de esforços de corte no processo de maquinagem.

Optou-se por fazer este estudo para as ferramentas de corte responsáveis por maquinar o produto em teste, anteriormente selecionado. Sabendo que este produto é constituído por um material muito semelhante aquele que foi apresentado no capítulo 4 para a liga L, podem ser utilizados valores das pressões específicas de corte (K_s) desenvolvidas para esta liga e coeficientes de atrito (μ) para os parâmetros de corte a testar.

Tendo em conta que se fez o acompanhamento da introdução das ferramentas de PCD, apresentadas na Figura 7.1, no processo produtivo e pelo facto do trabalho anteriormente desenvolvido (que fornece os valores de K_s e μ) ter sido feito com recurso a ferramentas neste material, associado ao interesse existente no meio científico na maquinagem com este tipo de ferramentas em diversos materiais, optou-se pela utilização das ferramentas de PCD também para estes ensaios. Os suportes que promovem a fixação das ferramentas aos centros de maquinagem são incorporados e do tipo HSK63A.

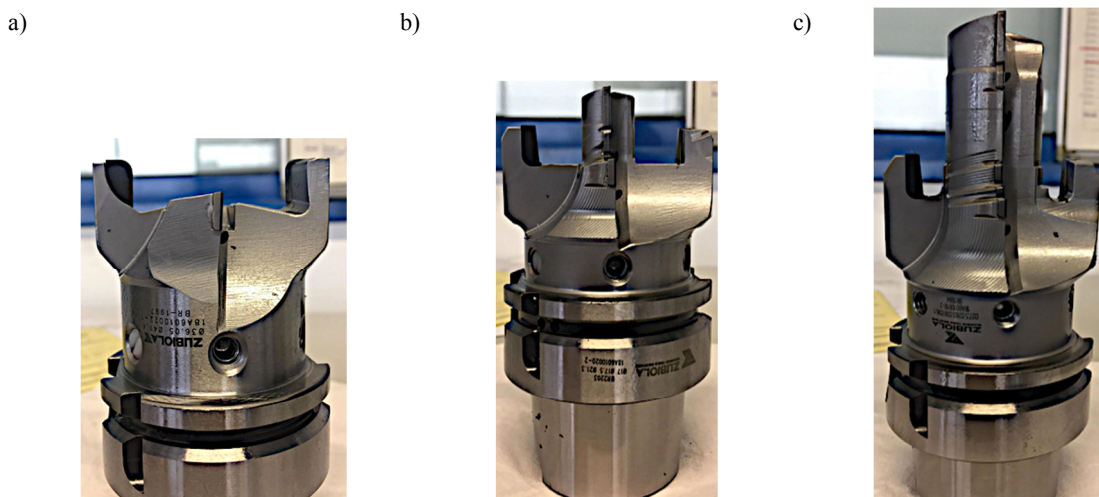


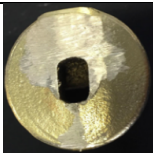
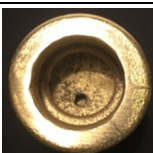



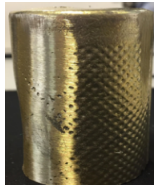



Figura 7.1- Ferramentas para ensaio: a) Broqueador da base; b) broqueador de desbaste da bica; c) Broqueador desbaste do cartucho.

7.1 Ensaio experimental

7.1.1 Preparação do ensaio

Foi definido que para garantir uma maior certeza relativamente aos valores medidos, seriam feitas três operações de furação para cada uma das ferramentas. Assim sendo, foi necessário preparar cinco amostras, que foram retiradas diretamente do processo produtivo. A preparação envolveu as operações de corte e de lixamento, de modo a que se obtivesse a configuração final dos provetes para o ensaio, apresentados na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Provetes utilizados no ensaio de furação

Proвете para broqueador de desbaste da bica	Proвете para broqueador de desbaste do cartucho	Proвете para broqueador da base
		
		
		

Para a escolha do equipamento a utilizar para a realização dos ensaios de furação, teve-se em conta que as ferramentas consideradas apresentam o suporte incorporado que lhes permite a ligação à máquina. Assim, procedeu-se à escolha de um equipamento que trabalhasse com este tipo de suporte recorrendo-se para tal ao INEGI, onde foi utilizado o equipamento DMU60 eVo (Figura 7.2). Este tem uma potência e frequência de rotação desejados para o ensaio, além de permitir a ligação de equipamento necessário para a aquisição de dados.

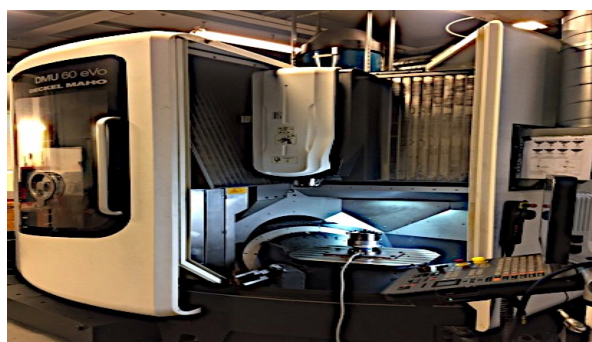


Figura 7.2 - Máquina DMU60 eVo utilizada no processo de furação.

Inicialmente, o objetivo do ensaio passava por replicar todos os parâmetros e características verificados no fabrico do produto no processo produtivo da empresa. De igual forma, procurou-se utilizar lubrificação interna e externa a uma pressão de 40 bar, valor mínimo que a máquina de ensaio permite. Contudo, este valor acaba por ser duas vezes superior àquele que é utilizado na Grohe Portugal.

Os parâmetros de corte são, então, os mesmos que foram apresentados na Secção 6.2.3 e que se encontram esquematizados na Tabela 7.2, abaixo apresentada:

Tabela 7.2 - Parâmetros de corte utilizados para o processo de modelação de forças de corte

Ferramenta	a_p (mm)	N (rpm)	f_n (mm/rot)
Broqueador Desbaste da Bica	0 - 20	2000	0.15
	0 - 39	1000	0.5
Broqueador Desbaste Cartucho	39 - 49	1400	0.214
	0 - 5	1100	0.364
Broqueador da Base	5 - 10	1100	0.0027

A fixação foi feita recorrendo a uma bucha de quatro grampos (Figura 7.3), sendo que para cada uma das amostras foi utilizado um apalpador que permitiu garantir a horizontalidade das superfícies e o zero da peça.

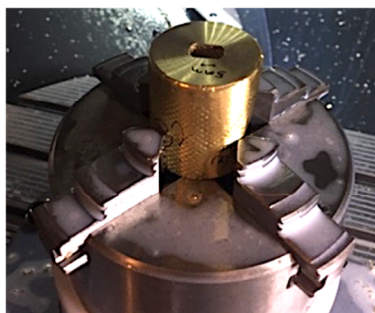


Figura 7.3 - Fixação dos provetes na bucha de quatro grampos, após a preparação dos mesmos.

O conhecimento dos esforços envolvidos no processo de maquinagem trazem inúmeras vantagens no sentido de estabelecer a melhor relação entre a produtividade e o desgaste das ferramentas de corte. Nos ensaios de furação, para além das tradicionais forças segundas os três eixos, o binário (M_z) necessário para imprimir a rotação da ferramenta é também importante. Para a aquisição dos dados das forças de corte e do binário foi necessário recorrer a equipamentos especializados, nomeadamente de um dinamómetro piezoelétrico, de um sistema de amplificação desses sinais e um sistema de aquisição de dados. Para a medição dos esforços de corte e do binário resistente durante a furação foi utilizada uma célula de carga, composta por um dinamómetro piezoelétrico *KISTLER 9272*. Na Figura 7.4 apresenta-se o sistema utilizado para a obtenção de esforços de corte.

É de salientar que foi usado um fator de conversão de 1000V/N, isto é, os valores resultantes no sistema de aquisição de dados serão apresentados numa gama compreendida entre

-10V e 10V, sendo que para se obterem os valores equivalente em Newton será necessário multiplicar cada um desses valores por 100.

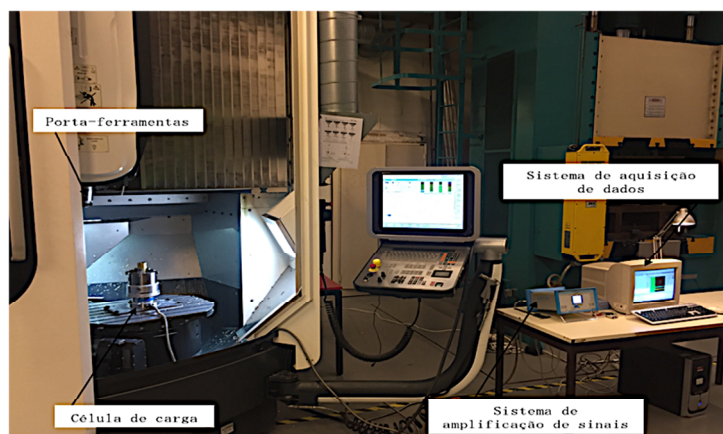


Figura 7.4- Conjunto de equipamentos utilizados na medição de esforços da ferramenta de corte.

7.1.2 Resultados experimentais

Após ter sido feita a preparação de todo o ensaio, optou-se por iniciar o mesmo com o broqueador de desbaste da bica. Logo no primeiro ensaio verificou-se que a qualidade/geometria conseguida para as amostras seria um entrave à utilização dos parâmetros de corte definidos pela empresa. Isto porque as amostras sofreram um conjunto de operações que lhes permitiu serem adaptadas para este ensaio, removendo-lhes uma quantidade de material muito grande, o que impediu a correta fixação das buchas de quatro grampos, de forma a garantir uma imobilização eficaz. Desta forma, foi necessário fazer um reajuste aos valores de avanço (f_n) a utilizar para os restantes ensaios, mantendo-se a frequência de rotação (n) previamente definida. Optou-se também por evitar a variação de avanços e frequências de rotação, no decorrer dos ensaios, de modo a que fosse mais fácil fazer a análise aos resultados obtidos.

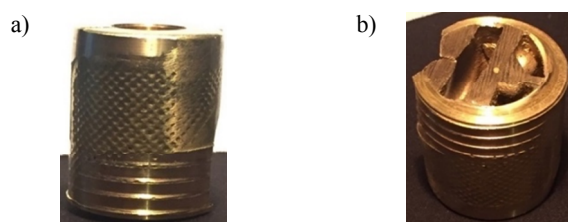


Figura 7.5- Provete danificados devido à incapacidade de fixação com bucha de 4 mordentes: a) vista lateral; b) vista de cima.

Verificou-se também que não seria possível fazer os testes para a ferramenta de desbaste do cartucho pela mesma razão enunciada anteriormente, já que ao inserir uma das amostras no sistema de fixação esta não ficava imobilizada. Na Figura 7.5 apresenta-se a peça resultante do processo de furação com os parâmetros de corte considerados inicialmente, nela verificam-se as marcas feitas pela bucha de fixação quando a peça rodou. Desta forma, ao realizar o ensaio estariam a ser obtidos resultados indesejados resultantes da vibração da amostra, inexistência de

concentricidade entre a amostra e a ferramenta, além de se poder introduzir um desgaste na ferramenta, ou mesmo quebra das arestas de corte.

Assim, foram realizados um total de seis ensaios, três para cada uma das ferramentas de corte. Fazendo uma análise aos valores obtidos escolheram-se dois ensaios (Figura 7.6 e 7.7) (um de cada ferramenta) para que se procedesse a uma comparação com o modelo de previsão de forças de corte. Os restantes ensaios e os respetivos parâmetros de corte utilizados encontram-se me anexo.

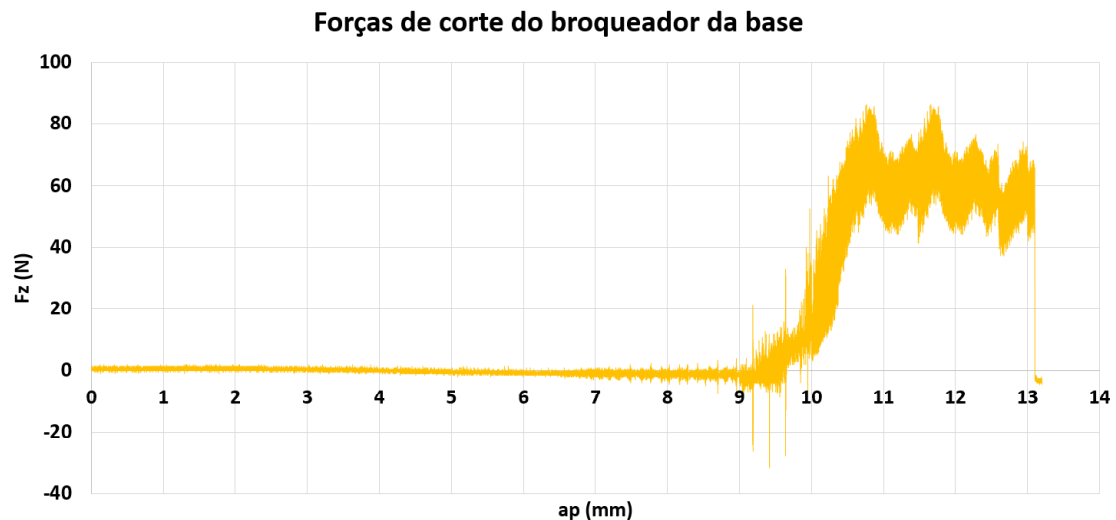


Figura 7.6- Forças de corte obtidas no processo de furação para o broqueador da base.

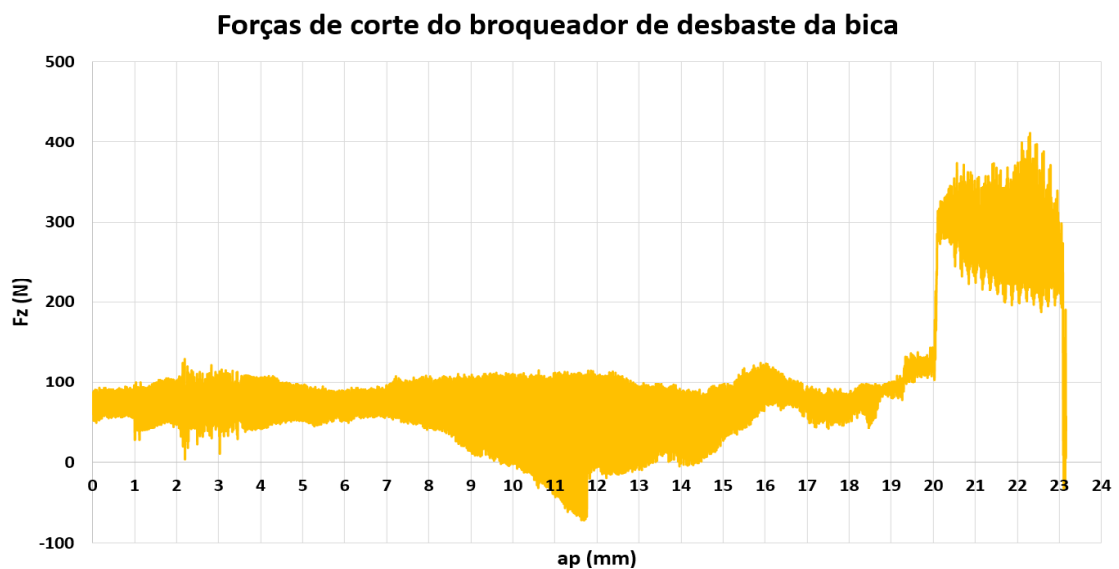


Figura 7.7- Forças de corte obtidas no processo de furação para o broqueador de desbaste da bica.

É de extrema importância salientar o facto de ter sido utilizada uma frequência de recolha de dados excessiva que levou às flutuações dos valores apresentados nos gráficos das Figuras 7.6 e 7.7.

7.2 Modelo mecanicista de previsão de forças de corte

Uma vez que o objetivo do trabalho passa também por prever os esforços de corte das ferramentas selecionadas no processo de furação, foi necessário recorrer à literatura para encontrar um modelo que se aproximasse com o tipo de operação desempenhadas por estas ferramentas. Assim, constatou-se que a furação é o processo ideal para servir como termo de comparação, uma vez que apresenta apenas movimento de translação numa componente dos eixos considerados. Apesar de existirem algumas diferenças assinaláveis, principalmente ao nível da geometria das ferramentas de corte utilizadas no modelo e as que serão testadas, estas serão discutidas após a apresentação do modelo, na altura em que for feita a extrapolação do modelo mecanicista em causa para as ferramentas de corte em análise.

7.2.1 Modelo mecanicista de previsão de forças de corte para uma broca helicoidal

O processo de furação realizado com brocas helicoidais pode ser dividido em quatro fases. A primeira fase ocorre antes da broca atingir a peça e é caracterizada pela rotação livre da broca. A segunda fase começa quando a broca inicia contacto com a peça de trabalho, sendo frequente definir-se este momento como movimento de derrapagem. É um fenómeno de natureza aleatória e é função da área de peça e da aresta transversal da broca. Contudo, esta etapa acaba por durar apenas algumas rotações, já que depois a broca acaba por estabilizar. A terceira fase é uma fase de transição desde o momento em que a broca estabiliza e o momento em que a broca atinge o diâmetro total. A partir do momento em que o furo tem o mesmo diâmetro que o diâmetro da broca, é iniciada a quarta fase [54].

Para a definição de um modelo mecanicista para um processo de furação é preciso fazer uma clara distinção das forças que atuam no sistema. Assim, é definida a *thrust force* (F_{th}), normal à aresta de corte, força lateral (F_{lat}) ortogonal à força de corte e à *thrust force* e atua na direção da aresta, enquanto que a força de corte (F_{cut}) atua de forma oposta à velocidade na aresta de corte. Este conjunto de forças acaba por ser decomposto na força F_z que corresponde à força de avanço. Este conjunto de forças encontra-se esquematizado na Figura 7.8 [55].

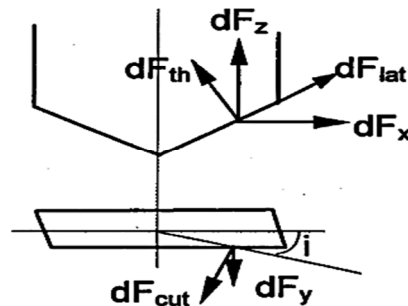


Figura 7.8 - Representação das forças envolvidas no processo de corte, operação da furação com broca helicoidal [55].

O desenvolvimento no presente modelo teve em conta três sistemas de coordenadas: sistema de coordenadas inercial ($X Y Z$), o sistema de coordenadas em rotação com o corpo da broca ($\xi \tau z$) e o sistema de eixos giratório da ponta da broca ($x y z$), tal como é apresentado na Figura 7.9. O eixo ξ está na direção da aresta principal de corte, o eixo τ é perpendicular à aresta de corte principal e o eixo z coincide com o eixo da broca. O referencial na ponta da broca ($x y z$) é fixo no ponto de perfuração, sendo que os eixos x e y são sempre paralelos às direções ξ e τ . O referencial inercial ($X Y Z$) é também o sistema de coordenadas do dinamómetro. A *thrust force*, o momento resistente, a força radial e os deslocamentos transversais da ponta da broca são obtidos segundo este referencial. O eixo Z é coincidente com o eixo da broca. Os eixos X e Y coincidem com os eixos ξ e τ , respetivamente, no momento do primeiro contacto da ponta da broca com a superfície da peça de trabalho [54].

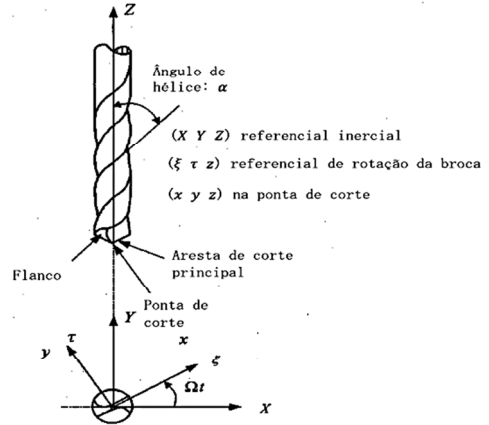


Figura 7.9 - Sistemas de eixos da broca [54].

De acordo com a bibliografia adotada é possível encontrar diferentes designações para os mesmos parâmetros essenciais ao desenvolvimento e compreensão do modelo. Desta forma, partindo da Figura 7.10, encontram-se as designações adotadas para o modelo aqui apresentado:

- p – ângulo da aresta de corte com o eixo dos zz
- α – ângulo da hélice
- w – distância que separa as arestas de corte
- r – raio
- δ_n – ângulo de ataque
- i – ângulo de inclinação

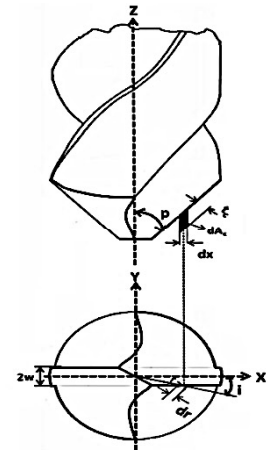


Figura 7.10 - Designações dos parâmetros do modelo mecanicista considerado [54].

Os modelos mecanicistas baseiam-se na premissa que a força de corte é proporcional à área da apara formada ao longo da aresta de corte, sendo a pressão específica de corte (função dos parâmetros de corte utilizados) a constante de proporcionalidade [56].

No que às forças resultantes do processo de corte diz respeito devem ser consideradas a força normal à aresta de corte (F_n) e a força de atrito (F_f) que se considera atuar na direção do escoamento da apara sobre a face de ataque da ferramenta de corte. Ambas as forças são consideradas proporcionais à área da apara, tais que:

$$dF_n = dA_c \cdot K_n \quad (7.1)$$

$$dF_f = dA_c \cdot K_f \quad (7.2)$$

Sendo A_c a área da apara, K_n e K_f os valores das pressões específicas de corte na direção normal e na direção tangencial à face de ataque, respetivamente.

É usual definir-se o valor de K_n e K_f como sendo função da espessura da apara (t_c), da velocidade de corte (V_c) e do ângulo da face de ataque da ferramenta δ_n [54].

$$K_n = a_0 \cdot t_c^{a_1} \cdot V_c^{a_2} \cdot \delta_n^{a_3} \quad (7.3)$$

$$K_f = b_0 \cdot t_c^{b_1} \cdot V_c^{b_2} \cdot \delta_n^{b_3} \quad (7.4)$$

Contudo, estas expressões não podem ser utilizadas diretamente, uma vez que as ferramentas de corte podem ter um ângulo de face de ataque (δ_n) negativo, o que daria origem a pressões específicas de corte com números complexos. Uma outra formulação foi feita de modo a garantir que esta condição seja ultrapassada, dando origem às seguintes equações:

$$\ln(K_n) = a_0 + a_1 \cdot \ln(t_c) + a_2 \cdot \ln(V) + a_3 \cdot \ln(1 - \sin \delta_n) \quad (7.5)$$

$$\ln(K_f) = b_0 + b_1 \cdot \ln(t_c) + b_2 \cdot \ln(V) + b_3 \cdot \ln(1 - \sin \delta_n) \quad (7.6)$$

Sendo que estes parâmetros acabam por ser obtidos recorrendo a testes de calibração onde, variando os diferentes parâmetros acima referidos, são obtidos as constantes de calibração apresentadas nas equações 7.5 e 7.6 ($a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2$ e b_3) [54].

A área da apara é definida no plano em que a normal é coincidente com a direção da velocidade de corte, de tal forma que é possível escrever:

$$dA_c = \frac{dx \cdot t_c \cdot \cos i}{\sin p} \quad (7.7)$$

Para este tipo de modelos é também usual definir-se que a superfície a perfurar e a superfície de contacto da broca são paralelas, assumindo ainda que a espessura da apara é definida como sendo normal à aresta de corte. Assim, para um modelo de processo “estático” do processo de furação, as vibrações e a assimetria da ponta da broca e da peça de trabalho podem ser desprezadas. A fórmula a seguir apresentada diz respeito à formação de apara de espessura constante:

$$t_c = \frac{f_n \cdot \sin p}{2} \quad (7.8)$$

Contudo são muitos os fatores que levam à vibração da broca durante o processo de corte, fazendo com que a espessura da apara não seja igual e, consequentemente, as forças radiais em cada uma das arestas de corte deixem de se anular. Também a flexão da broca faz com que a espessura da apara possa não ser constante. Para facilitar a formulação do modelo, todos estes fatores serão desprezados.

Através da decomposição das forças na aresta da ferramenta de corte, verifica-se que a força segundo a direção z (F_z) é função da força de corte da direção do avanço (F_{th}) e da força lateral (F_{lat}), tal como é apresentado na Figura 7.11.

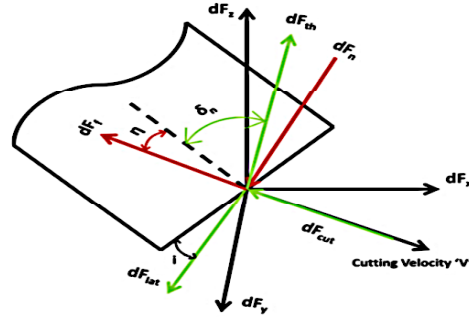


Figura 7.11 - Representação das forças desenvolvidas pela ferramenta de corte [57].

Sendo que η corresponde ao ângulo de escoamento da aparta sobre a face de ataque da ferramenta de corte e i corresponde ao ângulo de inclinação, as expressões de F_{th} e F_{lat} são obtidas em função dos valores das forças normais e de atrito (F_n e F_f) para cada uma das arestas de corte da broca em análise:

$$dF_{th} = dF_f \cdot \cos \eta \cdot \cos \delta_n - dF_n \cdot \sin \delta_n \quad (7.9)$$

$$dF_{lat} = dF_f \cdot (\cos \eta \cdot \sin i \cdot \sin \delta_n - \sin \eta \cdot \cos i) + dF_n \cdot \sin i \cdot \cos \delta_n \quad (7.10)$$

$$dF_{cut} = dF_f \cdot (\cos \eta \cdot \sin i + \cos \eta \cdot \cos \cdot \sin \delta_n) + dF_n \cdot \cos i \cdot \cos \delta_n \quad (7.11)$$

$$dF_z = \frac{dF_{th} \cdot \cos v \cdot \sin p}{\cos i} - \frac{dF_{lat} \cdot \cos p}{\cos i} \quad (7.12)$$

$$dM_z = r \cdot dF_{cut} \quad (7.13)$$

Os valores de v , η e i são definidos por relações trigonométricas e podem ser calculados de acordo com a equação 7.14 e 7.15, sendo que os valores de η e i podem ser assumidos como sendo numericamente iguais [54, 57].

$$v = \sin^{-1} \left(\frac{w}{r} \right) \quad (7.14)$$

$$\eta = i = \sin^{-1} \left(\frac{w \cdot \sin p}{r} \right) \quad (7.15)$$

De acordo com alguns trabalhos desenvolvidos, assume-se que a pressão específica de corte da direção tangencial à face de ataque da ferramenta é função da pressão específica de corte normal à aresta de corte, sendo que a constante de proporcionalidade é dada pelo valor do coeficiente de atrito (μ), isto é: $K_n = \mu \cdot K_f$ [57, 58].

$$dF_{th} = dF_n \cdot (\mu \cdot \cos \eta \cdot \cos \delta_n - \sin \delta_n) \quad (7.16)$$

$$dF_{lat} = dF_n \cdot (\sin i \cdot \cos \delta_n - \mu \cdot \cos \eta \cdot \sin i \cdot \sin \delta_n - \mu \cdot \sin \eta \cdot \cos i) \quad (7.17)$$

$$dF_{cut} = dF_n \cdot (\sin \eta \cdot \sin i + \mu \cdot \cos \eta \cdot \sin i \cdot \sin \delta_n + \mu \cdot \cos i \cdot \cos \delta_n) \quad (7.18)$$

Note-se que, ao longo de toda a formulação foi desprezada a zona de indentação, uma vez que apenas faz sentido considerá-la em processos como a microfuração onde o diâmetro é muito menor que a distância que separa as arestas de corte (conhecida por *web thickness*) [54].

Sendo que toda a análise é feita a um elemento infinitesimal sobre a aresta de corte, na fase final deverá ser feita o somatório das forças atuantes em cada um dos elementos.

7.2.2 Aplicação do modelo mecanicista de previsão das forças de corte da furação para as ferramentas de estudo

De acordo com o trabalho apresentado no Capítulo 4, já tinham sido realizados anteriormente ensaios que permitiram determinar a pressão específica de corte (K_s) com ensaios de torneamento para a liga utilizada na produção do produto em análise. Assim, é possível assumir que esta pressão específica de corte equivale ao valor da pressão específica de corte na direção normal (K_n). Como o objetivo deste trabalho passa por apresentar um modelo que seja capaz de prever os esforços de corte que vão de encontro àqueles que são obtidos nos ensaios, optou-se por escolher os parâmetros apresentados na Tabela 7.3 para realizar os ensaios.

Tabela 7.3 - Parâmetros de corte utilizados no ensaio das ferramentas de corte

Ferramenta	a_p (mm)	f_n (mm/rot)	n (rpm)
Broqueador Desbaste da Bica	23	0.0325	2000
Broqueador da Base	13	0.004545	1100

Nos gráficos das Figuras 7.12 e 7.13 é feita uma extrapolação dos valores de K_n em função dos valores obtidos para os ensaios acima referidos; tal aproximação é possível através da relação entre o valor da pressão específica de corte e o avanço da ferramenta apresentada na equação 2.5. Contudo, não existe uma relação direta entre o coeficiente de atrito (μ) e o avanço da ferramenta. Desta forma, foi utilizado um valor médio registado nos ensaios. Assim, será considerado um valor de coeficiente de atrito entre latão e PCD de 0.35, uma vez que este corresponde ao valor médio registado nos ensaios experimentais realizados na capítulo 4.

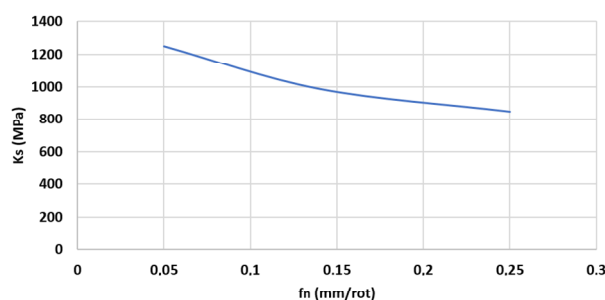


Figura 7.12- Relação de K_s com o avanço da ferramenta (f_n) para a liga L a uma frequência de rotação de 1100 rpm e profundidade de corte (a_p) de 1.5 mm.

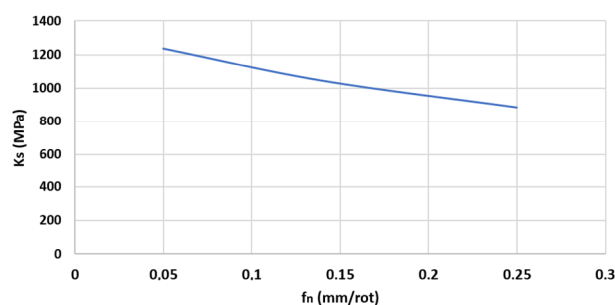


Figura 7.13 - Relação de K_s com o avanço da ferramenta (f_n) para a liga L a uma frequência de rotação de 2000 rpm e profundidade de corte (a_p) de 1.5 mm.

Tendo em consideração valores de avanço utilizados para as ferramentas apresentados na Tabela 7.3, e aplicando uma curva de ajuste equivalente àquele que foi apresentada na equação 2.5, fez-se uma extrapolação dos valores dos gráficos acima apresentados tendo-se obtido os valores da pressão específica de corte, apresentados na Tabela 7.4, para as avanços e frequências de rotação utilizados:

Tabela 7.4 - Valores de K_s em função dos parâmetros de corte ensaiados para cada uma das ferramentas de corte

	Broqueador da base	Broqueador de desbaste da bica
K_s (MPa)	2216.5	1364.5
μ	0.35	0.35

Fazendo de seguida uma análise à configuração das ferramentas escolhidas constatou-se de que é possível fazer um conjunto de simplificações que tornam o modelo bastante mais prático. Na Figura 7.14 é apresentada uma vista de cima dos broqueador de desbaste da bica e broqueador da base, enquanto que na Figura 7.15 é apresentada a vista lateral das mesmas ferramentas de corte.

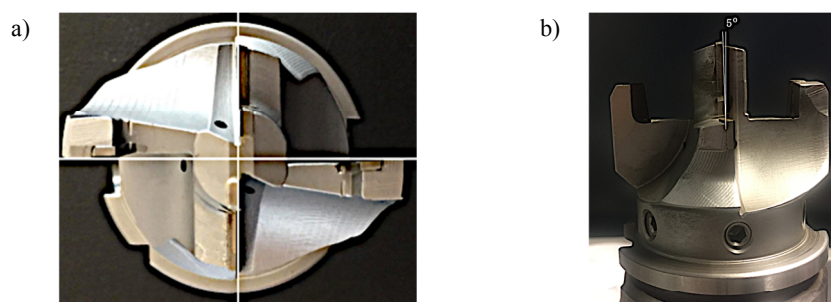


Figura 7.14- Análise à geometria do broqueador de desbaste da bica.

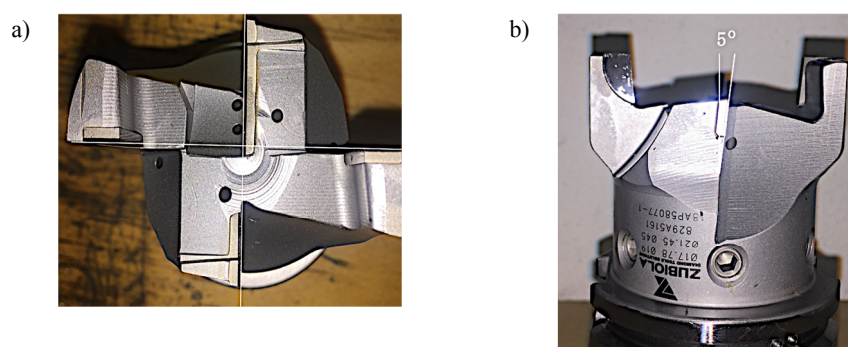


Figura 7.15- Análise à geometria do broqueador da base.

Para ambas as ferramentas verifica-se que a distância que separa as duas arestas de corte (*web thickness*) é nula. Este facto traduz-se numa simplificação de um grande número de expressões, nomeadamente o valor de ν , de η e i são nulos:

$$\nu = \sin^{-1}\left(\frac{0}{r}\right) = \sin^{-1}(0) = 0 \quad (7.19)$$

$$\eta = i = \sin^{-1}\left(\frac{0 \cdot \sin p}{r}\right) = \sin^{-1}(0) = 0 \quad (7.20)$$

Da análise das Figuras 7.14 e 7.15 é possível constatar que o ângulo que equivale ao ângulo de ponta da ferramenta (p) é 90° . O único ângulo que não é anulado pela geometria da ferramenta é o ângulo da face de ataque da ferramenta (δ_n). Tendo em conta todas as simplificações, as equações 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12, assumem a forma abaixo apresentada:

$$dF_{th} = dF_n \cdot (\mu \cdot \cos 0 \cdot \cos \delta_n - \sin \delta_n) \quad (7.21)$$

$$dF_{lat} = dF_n \cdot (\sin 0 \cdot \cos \delta_n - \mu \cdot \cos 0 \cdot \sin 0 \cdot \sin \delta_n - \mu \cdot \sin 0 \cdot \cos 0) = 0 \quad (7.22)$$

$$dF_{cut} = dF_n \cdot (\sin 0 \cdot \sin 0 + \mu \cdot \cos 0 \cdot \sin 0 \cdot \sin \delta_n + \mu \cdot \cos 0 \cdot \cos \delta_n) \quad (7.23)$$

$$dF_z = \frac{dF_{th} \cdot \cos \nu \cdot \sin p}{\cos i} - \frac{dF_{lat} \cdot \cos p}{\cos i} = \frac{dF_{th} \cdot \cos 0 \cdot \sin 90}{\cos 0} - \frac{0 \cdot \cos 90}{\cos 0} = dF_{th} \quad (7.24)$$

Assim, considerando que o valor da espessura da avara e da área de corte é dada pelas expressões abaixo apresentadas pode ser calculado o valor da força segundo o eixo dos zz (F_z):

$$dA_c = \frac{dx \cdot t_c \cdot \cos i}{\sin p} = \frac{dx \cdot t_c \cdot \cos 0}{\sin 90} = dx \cdot t_c \quad (7.25)$$

$$t_c = \frac{f_n \cdot \sin p}{2} = \frac{f_n \cdot \sin 90}{2} = \frac{f_n}{2} \quad (7.26)$$

$$\begin{aligned} dF_{th} = dF_z = dF_n \cdot (\mu \cdot \cos \delta_n - \sin \delta_n) &= K_n \cdot dA_c \cdot (\mu \cdot \cos \delta_n - \sin \delta_n) \\ &= K_n \cdot t_c \cdot db \cdot (\mu \cdot \cos \delta_n - \sin \delta_n) \\ &= K_n \cdot \frac{f_n}{2} \cdot db \cdot (\mu \cdot \cos \delta_n - \sin \delta_n) \end{aligned} \quad (7.27)$$

Conclui-se que para uma dada aresta de corte de comprimento b , o valor da força F_z é dado pela seguinte expressão:

$$F_z = K_n \cdot \frac{f_n}{2} \cdot b \cdot (\mu \cdot \cos \delta_n - \sin \delta_n) \quad (7.28)$$

Desta forma, a força de maquinagem total segundo o eixo dos zz, resulta do somatório dos esforços de cada uma das arestas de corte:

$$F_z^{maquinagem} = \sum F_z \quad (7.29)$$

De acordo com o modelo estabelecido, é necessário definir corretamente *a priori* todas as arestas de corte, a sua dimensão e o momento em que contribuem para a força de corte total da maquinagem. Para tal, apresenta nas Figura 7.16 e 7.17 a identificação e numeração adotada para as arestas de corte, para que estas possam ser mais facilmente nomeadas.

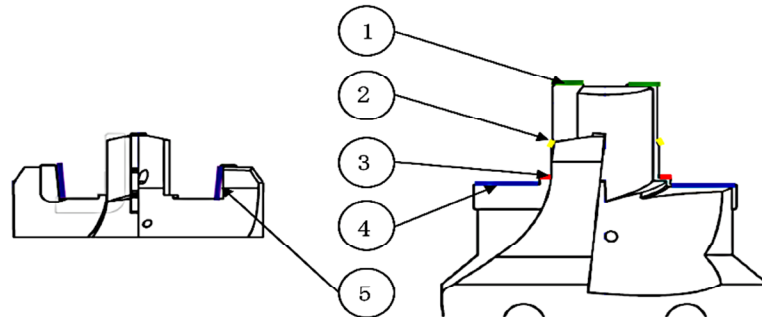


Figura 7.16 -Identificação das arestas de corte no brocador de desbaste da bica.

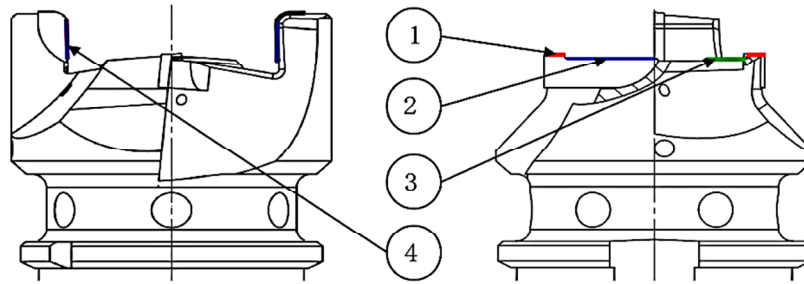


Figura 7.17 -Identificação das arestas de corte no broqueador da base.

Identificadas as arestas de corte, é possível estabelecer a que profundidade de corte estas entram em contacto com o provete, sendo que a partir desse momento é feita uma sobreposição de esforços. Assim, na Tabela 7.5 abaixo apresentada, esquematiza-se a que profundidade cada aresta inicia a sua ação de corte.

Tabela 7.5 - Arestas de corte em trabalho em função da profundidade de corte

Broqueador da base		Broqueador desbaste da bica	
$a_p(\text{mm})$	Arestas	$a_p(\text{mm})$	Arestas
0	4	0	1
9	1, 4	11	1, 5
10	1, 2, 3, 4	12.3	1, 2, 5
13	1, 2, 3, 4	18.8	1, 2, 3, 5
		20	1, 2, 3, 4, 5
		23	1, 2, 3, 4, 5

De acordo com os valores apresentados na Tabela 7.4 para a pressão específica de corte na direção normal (K_n), pode ser calculado o valor da força de corte na direção de zz (F_z), utilizando a equação 7.27. Fazendo a sobreposição dos esforços de maquinagem à medida que a aresta de corte entra em contacto com o provete, obtiveram-se as previsões apresentadas nos gráficos das Figuras 7.18 e 7.19 de esforços de corte em função da profundidade de corte.

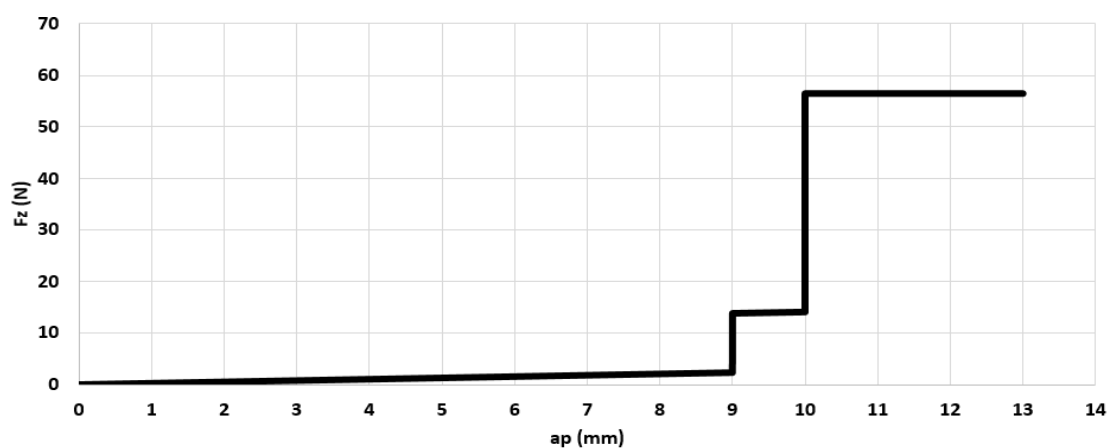


Figura 7.18- Previsão forças de corte para o broqueador da base.

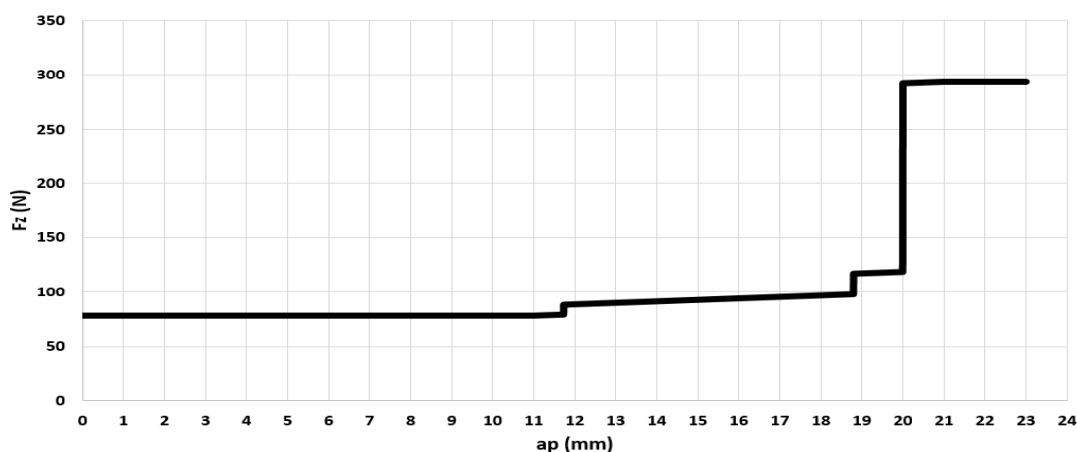


Figura 7.19- Previsão de forças de corte para o broqueador de desbaste da bica.

Este modelo de previsão permite fazer uma análise das arestas de corte e da sua importância/contribuição para o processo. Nos gráficos das Figuras 7.21 e 7.22 apresentam-se as influências das diferentes arestas de corte em função do valor máximo da força de corte gerado. Destes resultados sobressaem os valores dos esforços de corte desempenhados pelos buris que em ambos os casos rondam os 2%. Este valor é algo contraditório com os resultados esperados, em função dos valores registados na Secção 6.3 aquando do estudo do tempo de vida das ferramentas, uma vez na produção foi verificado que o principal desgaste verifica-se para estas arestas de corte. Para as restantes arestas de corte, os esforços de corte e a contribuição de cada uma delas para a força total está de acordo com aquilo que é verificado no processo produtivo.

A justificação encontrada para a situação apresentada pelos buris tem a ver com o facto de estes serem um elemento acessório ao processo de maquinagem, uma vez que são utilizados de modo a servirem como guia para o processo de lixamento. Assim, acabam por ser “sacrificados” já que se pretende que o centro da ferramenta trabalhe a uma dada velocidade de corte. Desta forma, a velocidade de corte na periferia acaba por ser superior o que leva a um desgaste prematuro deste tipo de elementos na ferramenta. Deste modo, seria de especial interesse fazer o reforço destas áreas de maior desgaste verificado na prática e utilizar algum tipo de revestimento sobre estes buris. A utilização de PCD nestes poderia ser uma realidade uma vez que não foi verificado desgaste nestas arestas de corte, conforme é ilustrado na Figura 7.20. Apesar de esta aresta de corte estar em contacto direto com material resultante do processo de fundição estas superfícies tiveram em contacto direto com a coquilha, garantindo-se então que não existe areias, uma vez que não são utilizadas machos para moldar estas superfícies.



Figura 7.20 - Estado da aresta dos buris da ferramenta de PCD após esta ser considerada inoperacional: a) vista de frente; b) vista lateral.

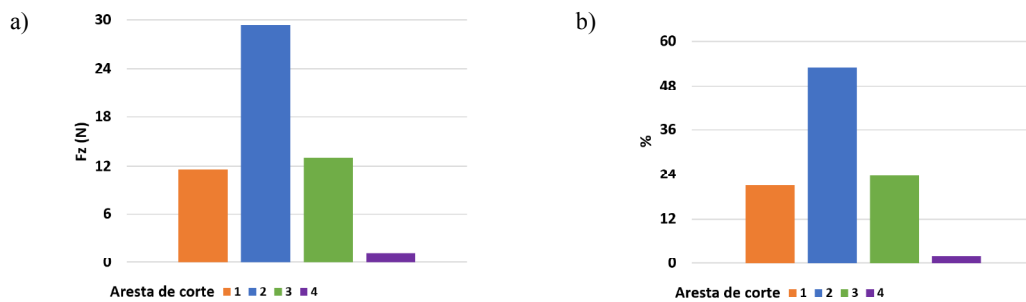


Figura 7.21- Previsão de esforços de corte para cada uma das arestas para o broqueador de desbaste da bica.

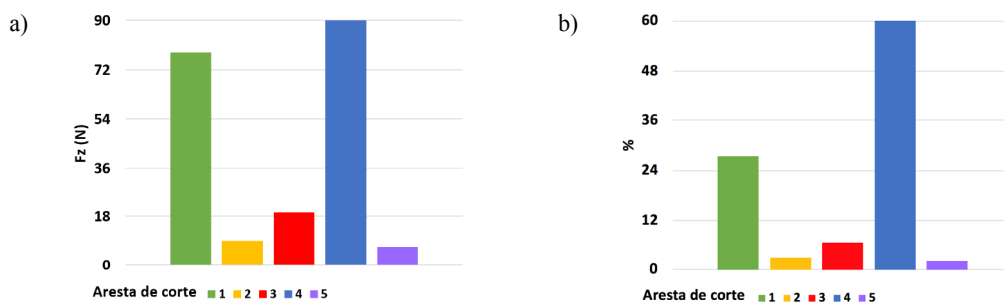


Figura 7.22 - Previsão de esforços de corte para cada uma das arestas para o broqueador da base.

Nos gráficos das Figuras 7.23 e 7.24 é feita a sobreposição dos valores calculados pelo método de previsão mecanicista e os valores obtidos nos ensaios de furação. Existem alguns fatores que podem ser estabelecidos como causa das diferenças verificadas. O primeiro tem a ver com o erro associado à consideração feita que K_f é função de K_n , sendo o coeficiente de atrito a constante de proporcionalidade. Ora, nesta situação é inserido outro erro que tem a ver com o valor considerado para o coeficiente de atrito, uma vez que este é também um valor aproximado. Um outro fator que contribui para que não se verificasse uma total concordância entre as curvas teóricas e as curvas medidas, tem a ver com a não consideração da força de indentação que corresponde ao instante de tempo desde que a aresta de corte inicia o contacto com o material a remover até que o contacto é feito de forma integral. Esta força é verificada para cada aresta e aumenta progressivamente com o avanço. Conforme referido anteriormente, também o facto de se ter utilizado uma frequência de recolha de dados elevada fez com que se verificassem as flutuações do gráfico experimental, uma vez que deste modo são captadas todas as vibrações do processo de corte. Estas vibrações poderão ter a ver essencialmente com o facto da ferramenta e a amostra não estarem totalmente concêntricas o que faz com que num lado da ferramenta os valores registados sejam superiores ao que são registados no lado oposto e ainda com o estado das amostras, uma vez que estas são resultantes da fundição com sobreespessuras e irregularidades nas superfícies.

Segundo os modelos analisados, verificou-se que as arestas paralelas ao eixo dos zz não realizam corte do material. Contudo, na prática isto também acaba por não ser verificado, uma

vez que a vibração da ferramenta e/ou peça faz com que as arestas acabem por remover material da parede do furo, sendo que os esforços introduzidos são residuais.

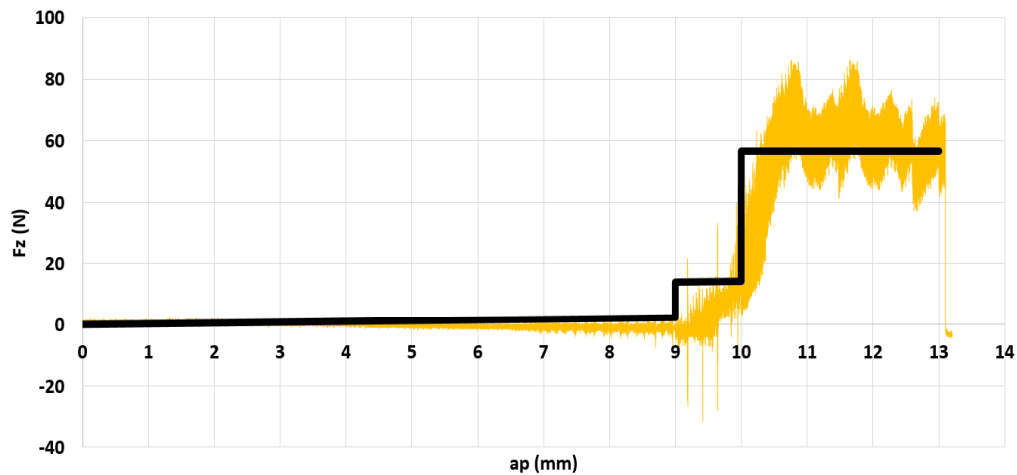


Figura 7.23- Comparação dos valores previstos e dos valores experimentalmente obtidos para broqueador da base.

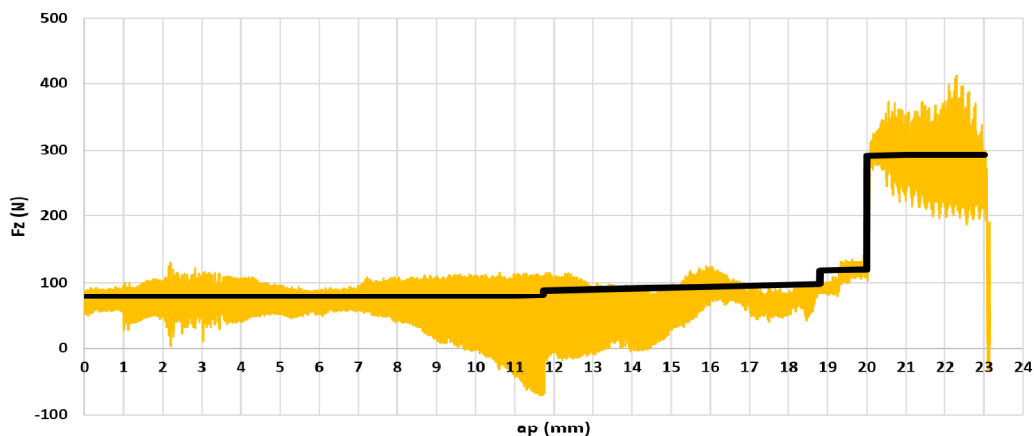


Figura 7.24- Comparação dos valores previstos e dos valores experimentalmente obtidos para o broqueador de desbaste da bica.

Há que ressaltar que a aproximação do modelo de uma broca helicoidal para as ferramentas de furação com geometria complexa usadas neste estudo é bastante aceitável uma vez que se pode considerar que a gama de valores é aproximadamente a mesma, sendo que os fatores que em alguns casos levam ao seu afastamento foram previamente justificados. É de real importância referir que o modelo apresentado traduz uma estimativa de esforços de corte médios onde não são contempladas as vibrações inerentes ao processo.

8 Trabalhos de melhoria contínua

8.1 Trabalhos desenvolvidos

Paralelamente ao estudo sobre o qual se debruça a presente dissertação, foram desenvolvidas algumas atividades complementares propostas pelos responsáveis da empresa, com vista a um melhor enquadramento no contexto empresarial. Aqui devem ser destacadas atividades como os 5S, SMED e o estudo dos tempos de ciclos com visto à sua otimização.

8.1.1 Tempos de ciclo

Com objetivo de melhorar os tempos de ciclo praticados no processo de maquinagem, verificou-se, que procedimentos como a alteração de parâmetros de corte, reajuste da distribuição das ferramentas de corte no armazém das ferramentas na CNC ou ajuste das velocidades e posições na aproximação das ferramentas de corte à peça em trabalho, poderiam ser algumas das formas de reduzir os tempos de maquinagem de um dado componente. Todas estas alterações têm como principal objetivo de aumentar a produtividade e, quando possível, precaver o desgaste acentuado das ferramentas de corte.

Como caso de estudo, optou-se por analisar os centros de CNC Triflex, uma vez que parecem ser aqueles que apresentam maiores possibilidades de serem otimizados. Desta forma, torna-se imperativo dar conhecimento do modo de funcionamento do centro de maquinagem, para que possam ser perceptíveis todas as alterações feitas e melhorias conseguidas. O centro de maquinagem é composto por quatro estações, tal como é apresentado na Figura 8.1. Cada uma destas estações é responsável por fazer um conjunto de operações, sendo de seguida rodada a mesa e um novo conjunto de operações é feito. De forma sucessiva, uma peça percorre as quatro estações e volta à estação 1 onde é retirada e é colocada uma nova peça para ser maquinada. Assim, cada uma destas estações tem um tempo de ciclo e, desta forma, o tempo de ciclo de produção de um dado componente é dado pelo maior dos tempos de ciclo registados no conjunto das quatro estações.

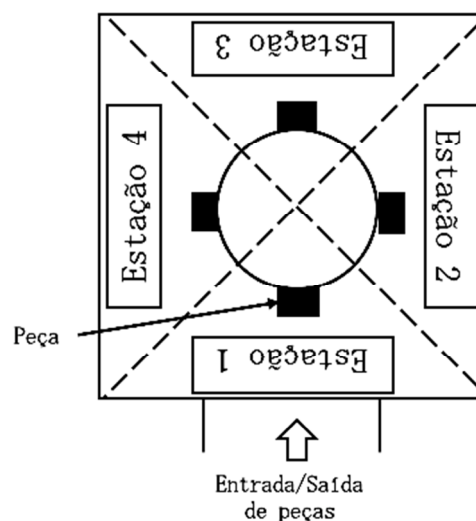


Figura 8.1 - Esquema de funcionamento do centro CNC Triflex.

Estabeleceu-se com objetivo a redução do tempo de ciclo em 20% para um dado produto. Para tal, fez-se a análise das quatro estações e identificou-se aquela que apresenta maior tempo de ciclo, sendo que estes valores estão registados na Tabela 8.1. Uma das abordagens a utilizar

para que seja possível alcançar a redução de 20% projetada correspondeu à alteração dos parâmetros de corte. Desta forma, foram aumentadas a frequência de rotação e a velocidade de avanço até valores considerados aceitáveis, de acordo com os valores previamente analisados e recomendados pelos fabricantes.

Tabela 8.1 - Parâmetros de corte e tempos de ciclo do produto a melhorar

Estação	Ferramenta	Antes	Depois		
		Tempo Ciclo s	Freq. Rotação rpm	Veloc. Avanço mm/min	Tempo Ciclo s
1	Broqueador Entrada de Água	52.7	1000	300	47.9
	Fresa M20x1		3000	1400	
2	Broca $\phi 16$ mm	51.9	3000	1200	46.2
	Broqueador Reg. Temperatura		1700	340	
	Fresa Engravamento $\phi 5$ mm		5000	1280	
	Fresa M36x1		2500	1000	
	Fresa em "T" Dupla		2500	1000	
3	Broqueador Saída da Bica	48.0	3600	540	43.7
	Macho M16x1.5		1500	600	
	Broqueador Saída Chuveiro		3600	540	
	Macho M15x1		1500	600	
	Broca Craniana		3000	1300	
4	Broqueador Manipulos	56.7	1700	680	50.5
	Fresa de interpolação M30x1.5		3000	1300	
	Fresa R.4		3000	1500	
	Fresa $\phi 2$ mm		3000	1500	
	Broca Desbaste		1700	340	

Assim, de forma geral foi feito um aumento de cerca de 10% aos diferentes parâmetros para as diversas ferramentas. Estas alterações fizeram com que os broqueadores de saída da bica desgastassem rapidamente, o que levou ao ajuste dos parâmetros de corte utilizados nesta ferramenta. Nas demais ferramentas não foi verificado um aumento de desgaste, o que permite concluir que estas se encontravam em subrendimento, já que com aumento dos parâmetros de corte, foi realizado um maior número de peças para o mesmo tempo de vida da ferramenta. Apesar de não ter sido alcançada a redução de tempo de ciclo projetada, prevê-se que esta seja possível e assim serão apresentadas posteriormente algumas sugestões que permitem que seja alcançada esta redução de 20% espectral.

8.1.2 5S

Os 5S corresponde a uma metodologia oriunda do Japão cujos propósitos passam por melhorar a eficiência através da distinção adequada de materiais (separar o que é necessário do desnecessário), organização, limpeza e identificação de materiais e espaços e a manutenção e

melhoria contínua deste modelo. Este método recebeu este nome devido à primeira letra de cinco palavras de origem nipónica: **Seiri** (Utilização), **Seiton** (Arrumação), **Seiso** (Limpeza), **Seiketsu** (Higiene), **Shitsuke** (Disciplina).

Esta metodologia traduz-se num aumento da competitividade devido ao clima organizacional que promove, que por sua vez é traduzido numa motivação extra para os funcionários, elevando assim os seus índices de produção, além de garantir um rápido acesso a qualquer tipo de utensílio ou instrução de trabalho de que estes necessitem para cumprir a sua função.

Sendo esta uma metodologia adotada pela Grohe Portugal, foi sugerido pela equipa que fossem desenvolvidas algumas melhorias nas seguintes áreas:

- Testes de estanquidade

Neste setor, foram delimitados os espaços de ação com a marcação de linhas e aplicação de chapas. Assim, conseguiu-se que a zona ficasse delimitada, evitando a existência de aglomeração de paletes de material ao longo do corredor a impedir a circulação dos operadores. Ficou ainda a sugestão de alteração de *layout* das bancadas de modo a aumentar a eficiência do colaborador reduzindo os movimentos deste. A segunda ação neste espaço passou por fazer a alteração e substituição das caixas de suporte do material necessário a realizar os testes de estanquidade, uma vez que as anteriores se encontravam em mau estado. Assim, as novas caixas são feitas de um material menos quebradiço, resolvendo a contrariedade identificada, além de permitir uma identificação mais fácil de cada um dos componentes. Com esta alteração, aumentou-se o tempo em que o operador fica a realizar os testes, evitando que este se desloque à procura de componentes. Na Figura 8.2 é apresentado o estado das caixas antes da melhoria introduzida, na Figura 8.3 apresenta-se o estado final.

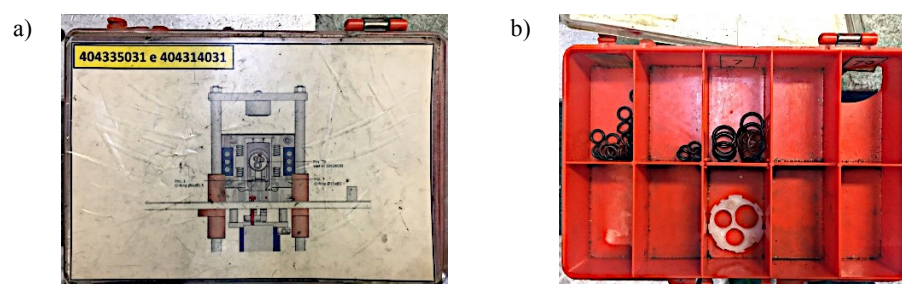


Figura 8.2 - Caixas antigas danificadas: a) exterior da caixa; b) interior da caixa.

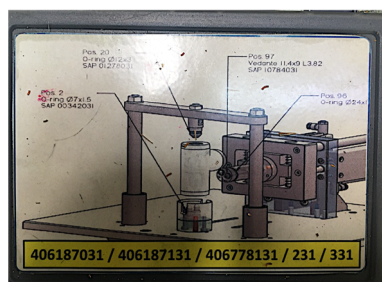


Figura 8.3 - Caixas de vedantes novas para o teste de estanquidade.

○ Ferramentaria da maquinagem

Na ferramentaria da maquinagem fez-se a realocação de alguns materiais, definição de zonas para equipamentos e reorganização do armário de arrumação do material de apoio (Figura 8.5). Para tal, fez-se a definição das zonas no chão e etiquetagem, conforme é ilustrado na Figura 8.4. Além disso, promoveu-se o melhoramento da consulta dos mapas de ferramentas, com alteração dos elementos antigos por elementos novos com uma melhor identificação e elementos capazes de promover uma maior facilidade aquando da consulta.



Figura 8.4 - Definição de zonas na ferramentaria da maquinagem.

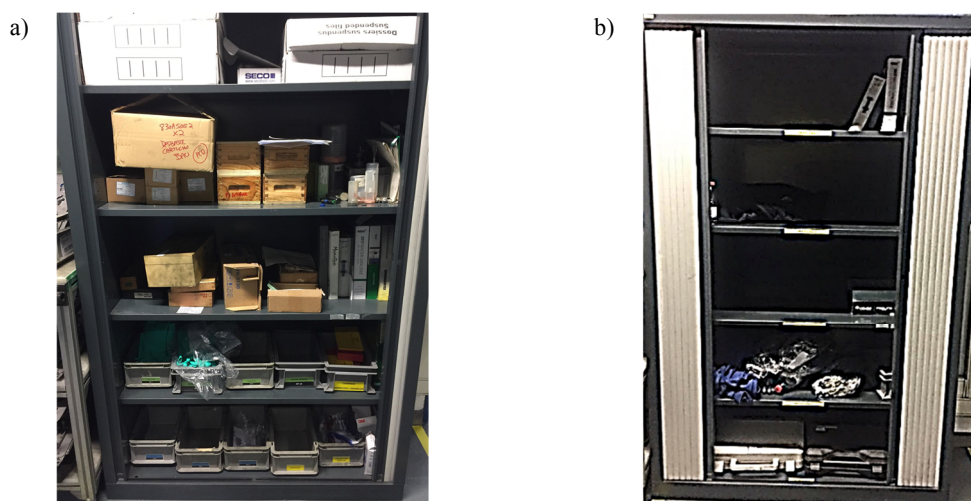


Figura 8.5 - Armário de arrumação: a) antes e b) depois da aplicação dos 5S.

- Informação da produção nas máquinas CNC

Junto aos centros CNC é obrigatória a existência de fichas técnicas relativas ao produto que está a ser produzido, folhas de registo de produção, folhas de registo da manutenção feitas ao equipamento e folhas de registo da análise às peças através dos calibres “passa/não passa”.

Anteriormente, toda esta informação era condensada num arquivo com argolas fixa na máquina. Contudo, esta opção levava à rápida degradação dos registos, de tal forma que não lhes permitia ser de novo arquivados. No sentido de tornar esta ação de preenchimento dos diversos registos mais fácil, foram feitas alterações progressivas, até que se obteve um modelo geral que, no presente momento, se encontra em vigor em todos os centros de maquinaria da Grohe Portugal. A evolução do processo encontra-se documentada no esquema da Figura 8.6.

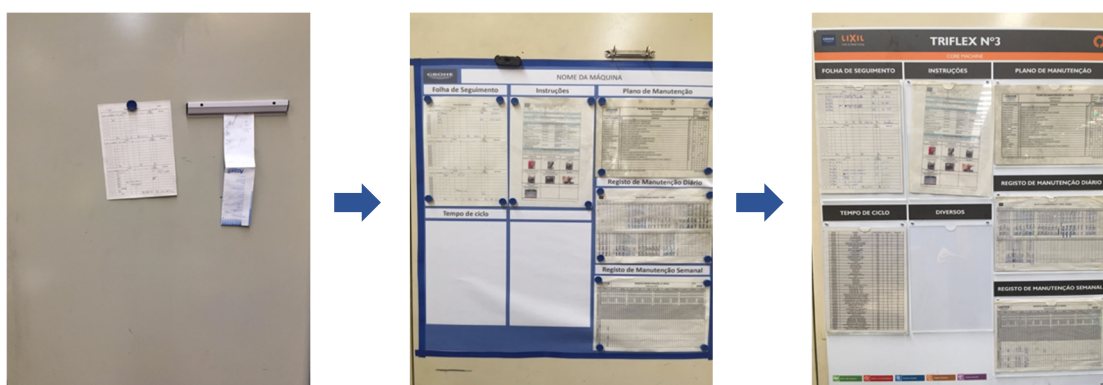


Figura 8.6 - Melhoria dos quadros de informação dos centros CNC.

8.2 Perspetivas de melhoria

8.2.1 Redução de tempos de ciclo

No sentido de dar seguimento ao trabalho anteriormente desenvolvido, sugerem-se neste tópico, duas abordagens que poderão ser tomadas no sentido de melhorar os tempos de ciclo e simultaneamente reduzir o consumo de ferramentas e ainda reduzir a quantidade de sucata gerada na maquinaria.

8.2.1.1 Balanceamento de ferramentas

A primeira sugestão diz respeito ao balanceamento de ferramentas de corte nas estações dos centros de maquinaria Triflex. Isto é, após ser feita a identificação da estação que apresenta um maior tempo de ciclo, deverá ser analisada uma ou mais ferramentas, para que estas possam ser realocadas para uma estação com menor tempo de ciclo. Assim, o objetivo passa por mover as ferramentas, até que se obtenham tempos de maquinaria em cada uma das estações muito próximos do tempo de ciclo de fabrico da peça.

8.2.1.2 Reajuste dos parâmetros de corte nas estações não limitadoras

Esta sugestão pretende reduzir o desgaste das ferramentas de corte. Sabendo de antemão que esta alteração de parâmetro de corte levava a um desgaste prematuro das ferramentas de corte, procurou-se minimizar esta consequência. Assim, nas restantes três estações, podem ser ajustados os parâmetros utilizados, de maneira a que o tempo de ciclo de cada uma das estações se aproxime do tempo de ciclo da peça, sem prejuízo para o tempo de ciclo global da peça. Desta forma, não há alteração dos tempos de ciclo e, existe um menor desgaste nas ferramentas de corte.

8.2.2 Proposta de melhoria para a gestão do inventário de ferramentas de corte

Um dos desafios propostos tem a ver com a melhoria na gestão das ferramentas de corte indispensáveis no processo de maquinagem. Esta medida traduz-se num controlo rigoroso ao inventário dos armazéns verticais (local onde são armazenadas as ferramentas de corte). A gestão eficiente destes elementos é garantida com a sua atualização permanente, além de possibilitar o registo de qualquer troca de ferramentas na produção.

Para responder a todas estas necessidades desenvolveu-se uma proposta de sistema que contempla as seguintes funcionalidades:

- Dar entrada, dar baixa ou anotar a troca de uma ferramenta de corte no armazém vertical;
- Anotar tempos que um dado elemento da equipa demora a fazer o *setup* de um produto numa máquina CNC;
- Preparar a lista de ferramentas que necessitam de ser enviadas para reparação;

Esta funcionalidade, além de permitir o controlo mais eficiente do inventário das ferramentas de corte, permite também o registo e atualização de base de dados, que anteriormente era feito manualmente ou feito em papel e, posteriormente, os dados são atualizados na base de dados. A possibilidade de preparar a lista de ferramentas necessárias a enviar para a reparação permite dar baixa imediata no sistema, além de possibilitar a criação de guias de transporte. De uma maneira geral, constatou-se que com este sistema, o trabalho de todos os elementos da equipa fica bastante simplificado, reduzindo-se assim o tempo despendido anteriormente nestas operações, além de manter a base de dados sempre atualizada. A fácil consulta dos *stocks* é a principal vantagem deste sistema.

8.2.3 Alteração da metodologia de controlo da qualidade à saída do processo de maquinagem

Uma outra sugestão aqui levantada tem a ver com o controlo da qualidade das peças maquinadas, já que o controlo com calibre “passa/não-passa” a cada duas (ou três) horas, acaba por ser insuficiente. No entanto, em alguns dos casos a deteção de defeitos ou incorreções resultantes do processo de maquinagem é feita de forma tardia fazendo com que, na maioria dos

casos, não seja possível fazer a recuperação do produto. Este facto é bastante desvantajoso porque é acrescentado valor à peça que se passa a ser sucata.

Uma das sugestões corresponde em aumentar o número de amostras sujeitas a controlo, isto é, em vez de fazer um controlo a cada duas (ou três) horas, deveria ser feito controlo ao fim de um dado número de peças produzido. Uma outra hipótese passaria por fazer um controlo por caixa/paleta antes do teste de estanquidade, ou no caso de se tornar o processo mais robotizado, poderia optar-se por uma solução mais sofisticada como é o caso da visão artificial.

8.3 Trabalhos futuros

8.3.1 Estudo dos parâmetros de corte ótimos

Numa perspetiva de trabalhos futuros, deixam-se aqui algumas sugestões que poderiam potenciar a produtividade e/ou redução de custos ligados ao processo de maquinagem. Um desses trabalhos passa realização de um estudo aos parâmetros de corte ótimos. Com isto não se quer dizer que sejam os parâmetros de corte que asseguram maior tempo de vida às ferramentas de corte, mas sim aqueles que proporcionam à empresa um rácio vantajoso entre produtividade e os custos das ferramentas de corte. Seria impensável fazer um estudo a todas as ferramentas, contudo uma análise ao top-20 ferramentas com maior índice de reparações permitirá fazer extrapolações para o restante produtivo.

Este estudo passaria por variar os parâmetros de corte inseridos nos centros de maquinagem, nomeadamente a frequência de rotação (n) e a velocidade de avanço (V_f). Por exemplo, a redução destes parâmetros de corte levaria a um maior tempo de operação e, consequentemente, a um aumento do tempo de ciclo, contudo o tempo de vida das ferramentas na globalidade aumentaria. No panorama atual de produção, que promove a constante redução de custos, esta possibilidade pode vir a tornar-se uma realidade em detrimento da produção.

8.3.2 Estudo da aproximação das ferramentas à peça a maquinar

Um outro assunto que carece de atenção diz respeito à aproximação das ferramentas às peças a maquinar. Uma vez que este movimento de trata de um tempo que não acrescenta valor às peças maquinadas, a sua otimização traduz-se, consequentemente, num ganho no tempo de ciclo, que por sua vez é traduzido no aumento de produtividade. Contudo, muitas das vezes, existe mais do que uma ferramenta a maquinar a peça na mesma altura e, como tal, este tipo de movimento pode ser feito por duas ferramentas em simultâneo que estejam a realizar uma dada operação. Desta forma, este processo requer especial atenção para que não se verifique colisão das mesmas.

8.3.3 Alteração da geometria das ferramentas de corte

Fez-se um acompanhamento a duas ferramentas em PCD com a mesma função, com geometria distintas. Uma das ferramentas de acabamento de cartucho tinha três arestas de corte, enquanto que a outra ferramenta tinha apenas duas. Ora, a ferramenta com três arestas de corte apresentou melhores resultados no que diz respeito ao número de peças produzidas, o que é de fácil entendimento uma vez que o esforço total de maquinagem é dividido pelas três arestas e não apenas por duas. Tal situação promove o aumento do tempo de vida destas ferramentas, o que é previsto pelo modelo mecanicista desenvolvido. Contudo, verifica-se um aumento no custo da ferramenta. Assim seria interessante, no futuro, fazer-se o estudo desta alteração de geometria numa ferramenta em metal duro e fazer uma análise aos possíveis ganhos, no que diz respeito ao rácio de peças produzidas/custo da ferramenta.

8.3.4 Adicionar um elemento de substituição do chumbo

Um estudo que também poderia ser interessante no interior do departamento seria a análise de uma liga Cu-Zn que contivesse alguns dos elementos alternativos ao chumbo como o bismuto, estanho ou silício. Desta forma, a liga Grohe Zero ganharia uma maior maquinabilidade e continuava a estar de acordo com as normas que exigem o valor residual do chumbo.

9 Conclusões

O trabalho desenvolvido ao longo desta dissertação permitiu retirar algumas conclusões no que diz respeito à maquinabilidade do latão com ferramentas em PCD e sobretudo analisar qual o efeito na maquinabilidade deste material na ausência do chumbo. Gostaria de salientar também que grande parte dos objetivos propostos foram alcançados com sucesso. Assim, no presente capítulo será feito um breve resumo de todas as conclusões que foram retiradas à medida que o trabalho foi desenvolvido.

No que diz respeito ao estudo sobre a maquinabilidade das ligas de latão utilizadas na Grohe com ferramentas em PCD, optou-se por não considerar as forças de avanço e de penetramento, tendo em conta que estas apresentam uma ordem de grandeza inferior às forças de corte. Fazendo-se uma análise aos valores registados para estas forças constatou-se que são fortemente influenciadas pelo avanço e pela profundidade de corte aplicada (sendo que o produto destes dois parâmetros origina a secção da apara), e que o efeito da velocidade de corte é irrelevante. A potência de corte foi calculada pelo produto da força de corte pela velocidade de corte e a análise feita aos valores registados revelou que esta era influenciada por todos os parâmetros em estudo. Quer para as forças de corte quer para as potências de corte verificou-se que a liga com menor teor de chumbo (Z) apresenta valores superiores às ligas R e L, sendo que estas duas (devido à sua semelhante composição) apresentam resultados na mesma ordem de grandeza entre si.

O parâmetro de maior interesse neste estudo é a pressão específica de corte (K_s), uma vez que esta dá indicação relativamente à maquinabilidade de um dado material, de modo que quanto maior for o valor de K_s maior é a dificuldade em maquinar um material. De modo geral, pode afirmar-se que a pressão específica de corte diminui com o aumento do teor de chumbo no material, como tal a liga Z é a que regista maiores valores de K_s . A variação do avanço introduz também alterações significativas nos valores registados da pressão específica de corte.

Relativamente à análise superficial verifica-se que esta não é influenciada pela velocidade de corte. Para R_a (Rugosidade Média Aritmética) todas as ligas apresentam valores na mesma ordem de grandeza, já para R_z (Rugosidade Máxima Média) e R_{max} (Rugosidade Máxima) verifica-se que a redução do teor do chumbo provocou agravamentos na qualidade superficial, uma vez que a liga Z apresentou valores consideravelmente maiores relativamente às ligas R e L, que apresentam novamente registos semelhantes entre si.

Durante o processo de medição de forças de corte foram analisadas as aparas geradas e verificou-se mais uma vez que as ligas R e L apresentam resultados semelhantes, com a formação de aparas desejáveis ao processo de maquinagem, uma vez que apareciam sobre a forma de apara curta e quebradiça. Por outro lado, a liga Z apresentava aparas indesejáveis em forma de fita e

helicoidais, este facto está de acordo com os resultados obtidos nos ensaios de compressão, uma vez que a liga Z é aquele que apresenta maior ductilidade à compressão, sendo que ao longo do processo de maquinagem é verificada uma constante compressão de material sem que se verifique a quebra da apara formada. Verificou-se que a diminuição da velocidade de corte e do avanço se traduzia na formação de aparas mais longas.

Todas estas considerações retiradas relativamente à influência dos parâmetros de corte analisados nas forças e potências de corte, pressão específica de corte, rugosidades e apara, foram corroboradas *à posteriori* com os resultados obtidos com a análise ANOVA.

Relativamente ao estudo do tempo de vida das ferramentas, os resultados não foram os esperados, uma vez que devido a alguns problemas associados à construção das ferramentas de corte de PCD, os resultados não foram todos retirados em tempo útil e, desta forma, não foi possível retirar uma conclusão geral. Feito o balanço entre o número de peças produzidas e o custo que cada ferramenta, verificou-se que para os broqueadores analisados os resultados ficaram bastante aquém das expectativas e apesar do broqueador de desgaste da bica ter apresentado uma produtividade satisfatória, necessitava de garantir uma maior produção para que seja considerado o investimento. Apesar do motivo que levou à remoção da ferramenta de produção ter a ver com lascamento das arestas de corte por desgaste, este facto vem corroborar as expectativas relativamente ao efeito abrasivo da areia no interior das peças fundidas. Este facto, associado à baixa tenacidade das ferramentas é apontado como principal justificação para os resultados indesejáveis obtidos. Assim, os dados mostram que a melhor solução relativamente ao rácio custo/benefício passaria por utilizar ferramentas em metal duro e, se possível, identificar uma solução que lhe garanta maior resistência nas zonas de maior desgaste, como a utilização de revestimentos. Contudo, nota-se que as ferramentas de PCD foram utilizadas com iguais parâmetros de corte às ferramentas de metal duro, contudo espera-se que ao serem utilizadas maiores velocidades, serão alcançados menores tempos de ciclo, permitindo uma maior produtividade.

O modelo mecanicista de previsão de esforços de corte permitiu suportar algumas das conclusões retiradas no ponto anterior. Os resultados obtidos mostram que as maiores forças registadas são realizadas pelas arestas de corte de maior comprimento, sendo que estas contribuem numa percentagem superior a 50% para a força total de maquinagem. Por outro lado, os buris laterais são os que teoricamente contribuem de forma menos significativa, uma vez que representam cerca de 2% desta força. Estes resultados, obtidos analiticamente, são corroborados pelo procedimento experimental, contudo não vão de encontro àquilo que é verificado no processo produtivo, uma vez que o desgaste dessas arestas de corte é a principal razão para a inoperacionalidade destas ferramentas de corte. Conclui-se então que este modelo poderá ser utilizado para identificar anomalias verificadas nas ferramentas de corte durante o processo produtivo. Da análise aos resultados registados nos dois ensaios (vida das ferramentas e tempo de vida das ferramentas) é possível adiantar uma solução que apresenta um rácio de

qualidade/preço bastante interessante e que será capaz de minimizar (ou resolver) o desgaste excessivo das arestas nos buris. Esta solução passa por fazer um reforço destas arestas, de forma a poderem ser utilizadas com pastilhas de metal duro sendo que nos buris se aplicaria revestimento ou este seria de PCD. Note-se que em todos os ensaios feitos não se verificou qualquer problema associado a esta aresta de corte pelo PCD.

Apesar deste modelo ser uma adaptação de um modelo utilizado para brocas helicoidais, foram apresentados bons resultados, mesmo tendo em conta todas as simplificações adotadas. Os resultados obtidos demonstram que a formulação que aproxima a pressão específica de corte na direção normal K_n e a pressão específica de corte na direção tangencial à face de ataque K_f é bastante válida, tendo em conta os resultados que apresentou. Considerando todos os fatores enunciados, espera-se que este modelo possa ser utilizado no futuro tendo em conta as boas indicações deixadas pelos resultados apresentados.

Os trabalhos futuros foram incorporados no capítulo anterior, onde é feita a descrição pormenorizada de cada uma das propostas. Note-se que estas são apresentadas em função das condições que a empresa oferece para este tipo de trabalhos. Assim, pode-se afirmar que todas as propostas feitas são perfeitamente exequíveis.

Com o trabalho desenvolvido na empresa verificou-se, que pequenas alterações no processo produtivo, podem traduzir-se em melhorias significativas e retorno ao nível de *outputs*. O ajuste dos parâmetros de corte permitiu alcançar uma redução na ordem dos 10%, sendo ainda apresentadas propostas que permitem alcançar reduções ainda mais significativas, como o ajuste de velocidades de aproximação das ferramentas à peça e redistribuição destas no interior da CNC. A aplicação de conceitos como 5S permitiu também alcançar maior produtividade, uma vez que são dadas ao operador melhores condições para que este desempenhe a sua função.

Referências

- [1] “GROHE - Grohe AG Company Page.” [Online]. Available: <https://www.grohe.com/>. [Accessed: 29-Jan-2018].
- [2] “Machining Processes.” [Online]. Available: <http://www.mfg.mtu.edu/cyberman/machining.html>. [Accessed: 12-Feb-2018].
- [3] J. P. Davim, *Princípios de maquinagem*. Coimbra: Livraria Almedina, 1995
- [4] “Sandvik Coromant.” [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/pages/default.aspx>. [Accessed: 12-Feb-2018].
- [5] L. Amaral, “Maquinabilidade de Ligas Cu-Zn e Impacto da Utilização de Ferramentas WC Revestidas em Processo Produtivo”, Dissertação Mestrado, FEUP, 2017.
- [6] A. M. P. de Jesus, “Processos de Fabrico I - Documentos de Apoio.” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, p. all, 2015.
- [7] ASM Handbook Committee, “Machining,” *ASM Handb.*, vol. 16, p. 1089, 1989.
- [8] G. Boothroyd and W. A. Knight, *Fundamentals of machining and machine tools*, Editora Scripta Book Company, 1989.
- [9] D. Ferrasi, *Fundamentos Da Usinagem Dos Metais*. Editora Edgard Blucher, 1970.
- [10] NPTEL, “Mechanical Engineering - Manufacturing Processes II.” [Online]. Available: <http://nptel.ac.in/downloads/112105127/>. [Accessed: 19-Feb-2018].
- [11] “mech4study,” 2014. [Online]. Available: <http://www.mech4study.com/>. [Accessed: 19-Feb-2018].
- [12] R. Soares, “Estudos de Maquinabilidade da Liga AlSi9Cu3 Recorrendo a Ferramentas PCD com Quebra-Aparas”, Dissertação Mestrado, FEUP, 2016.
- [13] Femec, “Ferramentas De Corte Para Torno,” 2016. [Online]. Available: <http://www.femec.com.br/usinagem/ferramentas-corte-torno.php>. [Accessed: 22-Mar-2018].
- [14] M. Fitzpatrick, “Geometria das ferramentas de corte”. [Online]. Available: http://srvd.grupoa.com.br/uploads/imagensExtra/legado/F/FITZPATRICK_Michael/Introducao_Processos_Usinagem/Lib/Cap_01.pdf. [Accessed: 20-Apr-2018].
- [15] U. F. do Paraná, “Geometria de corte,” *online*, 2015. [Online]. Available: http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/processoscorte_arquivos/Geometriadecorte.pdf. [Accessed: 11-Mar-2018].
- [16] “MITSUBISHI MATERIALS Web Catalog -Turning Tools, Rotating Tools, Tooling

- Solutions,” 2015. [Online]. Available: <http://www.mitsubishicarbide.net/>. [Accessed: 27-Feb-2018].
- [17] C. Industry, “ADVANCED ARENA: Cutting Tools,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ceramicindustry.com/articles/92178-advanced-arena--why-ceramic-cutting-tools->. [Accessed: 01-Mar-2018].
- [18] G. D. Limited, “CES Edupack 2013.” 2013.
- [19] L. N. L. De Lacalle, A. Lamikiz, J. F. De Larrinoa, and I. Azkona, “Chapter 2: Advanced Cutting Tools,” *Mach. Hard Mater.*, pp. 33–86, 2011.
- [20] SECO, “Secotools,” 2015. [Online]. Available: <https://www.secotools.com/#?terms=cutting+products>. [Accessed: 22-Feb-2018].
- [21] American Carbide Tools Company, “PCD Tools - Hard and tough as diamonds.” [Online]. Available: <http://www.americancarbidetool.com/precision-tools/pcd-tools/>. [Accessed: 27-Mar-2018].
- [22] Mapal, “Ferramentas em PCD.” [Online]. Available: https://www.mapal.com/fileadmin/02_Portuguese/PDF-files_Portuguese/Catalogues/MAPAL_Competencia_PCD_pt.pdf. [Accessed: 27-May-2018].
- [23] Modern Machine Shop, “PCD Tools Get Tough,” 2018. [Online]. Available: <https://www.mmsonline.com/articles/pcd-tools-get-tough>. [Accessed: 04-May-2018].
- [24] D. Mori, “Laser-Tec Series.”
- [25] MoldMaking Technology, “Laser-Cutting PCD Tools.” [Online]. Available: <https://www.moldmakingtechnology.com/articles/laser-cutting-pcd-tools>. [Accessed: 25-Jan-2018].
- [26] W. Konrad, D. Claus, H. Marcel, and W. Christian, “Laser Prepared Cutting Tools,” *Phys. Procedia*, vol. 39, pp. 240–248, 2012.
- [27] Synova, “The Laser MicroJet® Technology.” [Online]. Available: <https://www.synova.ch/>. [Accessed: 20-Nov-2017].
- [28] F. Klocke and T. Krieg, “Coated tools for metal cutting - features and applications,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 48, no. 2, pp. 515–525, 1999.
- [29] E. Lugscheider, O. Knotek, H. Zimmermann, and S. Hellmann, “Investigation of the mechanical and structural properties of Ti – Hf – C – N arc PVD coatings,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 119, pp. 239–243, 1999.
- [30] Prirev - Engenharia de Superfícies. [Online]. Available: <http://www.prirev.com/pt>. 2013, [Accessed: 18-May-2017].

- [31] Advanced Coating Service, “What is PVD Coating?” [Online]. Available: <https://acscoating.com/what-is-pvd-coating/>. [Accessed: 09-Mar-2018].
- [32] “REVESTIMENTOS CVD (Chemical Vapor Deposition) E PVD (Physical Vapor Deposition).” [Online]. Available: <http://moldesinjecao plasticos.com.br/limpeza-revestimento-cvd-pvd-texturizacao/>. [Accessed: 06-Apr-2018].
- [33] “Filtred Cathodic vacuum arc: process tool for future magnetic hard disc media,” pp. 1–11.
- [34] Direct Industry, “Ferramenta de corte - fresa.” [Online]. Available: <http://www.directindustry.com/pt/prod/dormer-pramet/product-14461-1630843.html>. [Accessed: 02-Jun-2018].
- [35] M. Lotfi, A. Akhavan Farid, and H. Soleimanimehr, “The effect of chip breaker geometry on chip shape, bending moment, and cutting force: FE analysis and experimental study,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 78, no. 5–8, pp. 917–925, 2015.
- [36] Mitsubishi, “Functions of chip breakers.” [Online]. Available: <http://mmc-permanent.learnways.com/courses/75/functions-of-chip-breakers.html>. [Accessed: 02-Jun-2018].
- [37] Molde Injeção Plásticos, “AVARIAS E DESGASTE DE FERRAMENTAS DE CORTE.” [Online]. Available: <http://moldesinjecao plasticos.com.br/avarias-e-desgastes-de-ferramentas-de-corte/>. [Accessed: 02-Jun-2018].
- [38] M. R. S. Tavares, *CFAC – Conceção e Fabrico Assistidos por Computador Indicação dos Estados de Superfície*. [Online]. Available: https://paginas.fe.up.pt/~tavares/ensino/CFAC-G/Downloads/Apontamentos/Estado%20de%20Superficies_p.pdf [Accessed: 06-Apr-2017].
- [39] S. Morais, *Desenho Técnico Básico 3*. Porto Editora, 2006.
- [40] HDX, “Vantagens e benefícios do uso do MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação).” [Online]. Available: <http://hdxoil.com.br/usinagem-2/vantagens-e-beneficios-do-uso-do-mql-minima-quantidade-de-lubrificacao>. [Accessed: 02-Jun-2018].
- [41] J. M. A. M. Gordo, “Tecnologia Naval - Materiais Metálicos,” Instituto Superior Técnico, 2004.
- [42] H. Imai *et al.*, “Characteristics and machinability of lead-free P/M Cu60-Zn40 brass alloys dispersed with graphite,” *Powder Technol.*, vol. 198, no. 3, pp. 417–421, 2010.
- [43] C. Nobel, F. Klocke, D. Lung, and S. Wolf, “Machinability enhancement of lead-free brass alloys,” *Procedia CIRP*, vol. 14, pp. 95–100, 2014.
- [44] C. Nobel, U. Hofmann, F. Klocke, D. Veselovac, and H. Puls, “Application of a new, severe-condition friction test method to understand the machining characteristics of Cu-

- Zn alloys using coated cutting tools,” *Wear*, vol. 344–345, pp. 58–68, 2015.
- [45] C. Vilarinho, J. P. Davim, D. Soares, F. Castro, and J. Barbosa, “Influence of the chemical composition on the machinability of brasses,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 170, no. 1–2, pp. 441–447, 2005.
 - [46] “Cu-Zn phase diagram.” [Online]. Available: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Cu-Zn-phase-diagram-greek.svg>. [Accessed: 02-Jun-2018].
 - [47] G. Pantazopoulos and A. Vazdirvanidis, “Characterization of the Microstructural Aspects of Machinable α and β Phase Brass,” 2008.
 - [48] F. P. de Castro and J. M. Junqueira, “Latões para Fundição. Cadernos de Metalurgia.” CETEM, Barcelos, 1996.
 - [49] Deutsches Kupferinstitut, “Recommended machining parameters for copper and copper alloys,” p. 68, 2010.
 - [50] M. A. Taha, N. A. El-Mahallawy, R. M. Hammouda, T. M. Moussa, and M. H. Gheith, “Machinability characteristics of lead free-silicon brass alloys as correlated with microstructure and mechanical properties,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 3, no. 4, pp. 383–392, 2012.
 - [51] H. Atsumi, H. Imai, S. Li, K. Kondoh, Y. Kousaka, and A. Kojima, “The characteristics of high strength and lead-free machinable α - β duplex phase brass Cu-40Zn-Cr-Fe-Sn-Bi alloy,” *Ceram. Trans.*, vol. 236, pp. 47–53, 2012.
 - [52] (Copper Development Association), “Copper and Copper Alloys Compositions , Applications and Properties Copper and Copper Alloys,” vol. 120, pp. 1–31, 1998.
 - [53] G. Chunlei, S. Dongfu, Z. Kaihong, W. Haiyan, and Z. Nan, “Failure analysis of a lead-free brass tap used in potable water,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 59, pp. 377–383, 2016.
 - [54] Y. Gong, C. Lin, and K. F. Ehmann, “Dynamics of initial penetration in drilling: Part 1 - Mechanistic model for dynamic forces,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 127, no. 2, pp. 280–288, 2005.
 - [55] H. Zhao and K. F. Ehmann, “Mechanistic model for spade drills for wood drilling operations, Part 1: Model development,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 125, no. 2, pp. 226–235, 2003.
 - [56] M. N. Vasconcellos and A. C. Araujo, “Análise das forças de corte no processo de furação de uma liga de aço inoxidável austenítico,” 6º Congresso brasileiro de engenharia de fabricação, 2005.
 - [57] R. K. Mittal, S. Yadav, and R. K. Singh, “Mechanistic Force and Burr Modeling in High-speed Microdrilling of Ti6Al4V,” *Procedia CIRP*, vol. 58, pp. 329–334, 2017.

- [58] J. Wu and R. Di Han, “Friction characteristics in green drilling titanium alloy Ti6Al4V,” *J. Shanghai Jiaotong Univ.*, vol. 17, no. 6, pp. 684–689, 2012.

Anexos

Ensaio de Furação

A - Broqueador de desbaste da bica

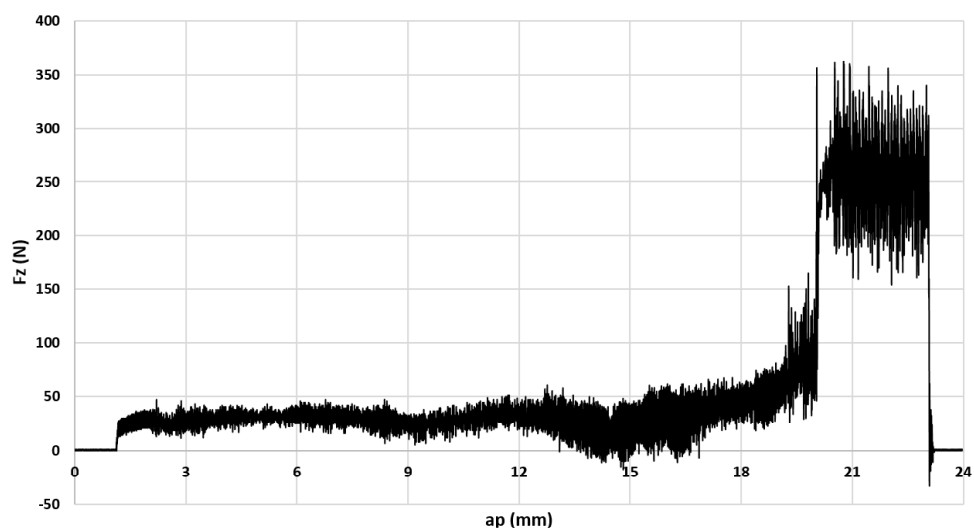


Figura A.1 - Ensaio de furação com o broqueador de desbaste da bica para $f_n = 55 \text{ mm/min}$ e $n = 2000 \text{ rpm}$.

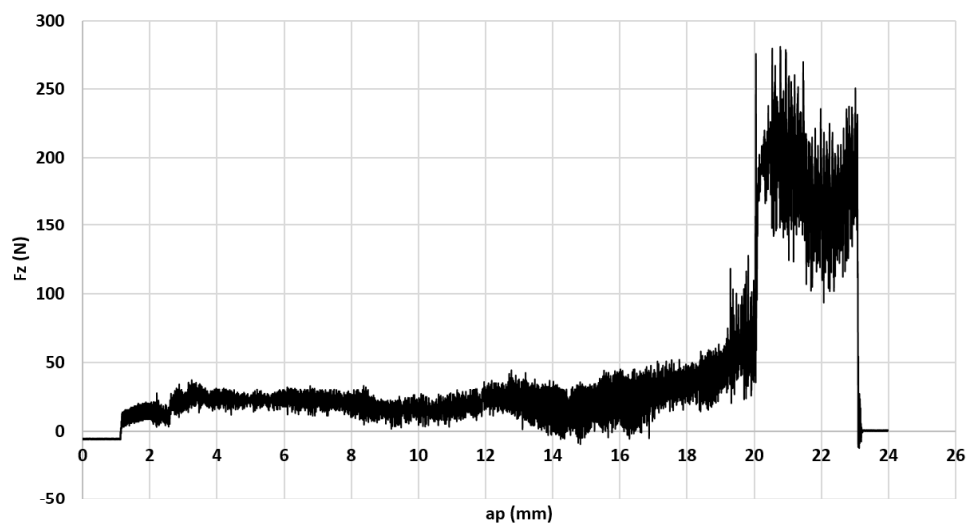


Figura A.2 - Ensaio de furação com o broqueador de desbaste da bica para $f_n = 45 \text{ mm/min}$ e $n = 2000 \text{ rpm}$.

B - Broqueador da base

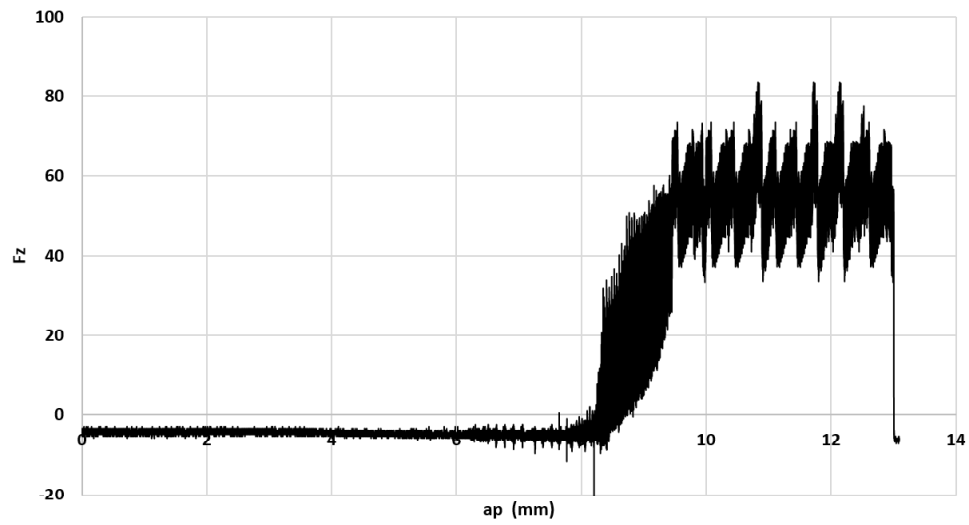


Figura B.1 - Ensaio de furação com o broqueador da base para $f_n = 4 \text{ mm/min}$ e $n = 1100 \text{ rpm}$.

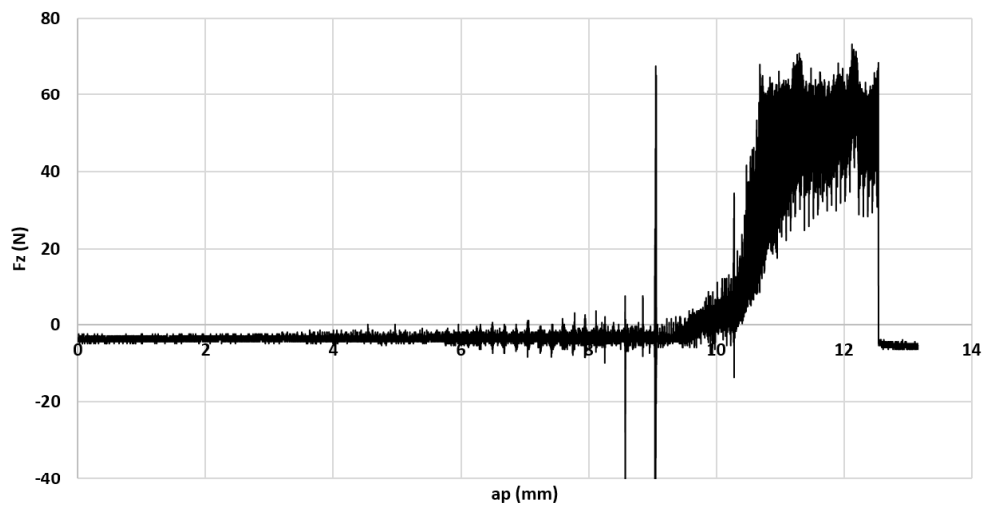


Figura B.2 - Ensaio de furação com o broqueador da base para $f_n = 7 \text{ mm/min}$ e $n = 1100 \text{ rpm}$.